

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE
TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE FUGAS DE
MICROONDAS PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN
TÉRMICA MICROONDAS-PAVIMIENTO

CARLOS ARTURO GIRALDO GUTIÉRREZ
JESÚS GUALDRÓN FLÓREZ
JUAN SEBASTIAN MÉNDEZ TEJADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOMECHANICAS
BUCARAMANGA

2004

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE
TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE FUGAS DE
MICROONDAS PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN
TÉRMICA MICROONDAS-PAVIMIENTO

CARLOS ARTURO GIRALDO GUTIÉRREZ
JESÚS GUALDRÓN FLÓREZ
JUAN SEBASTIAN MÉNDEZ TEJADA

Proyecto de grado para optar al título de Ingenieros Electrónicos

Director

MPE. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Codirector

PhD. CARLOS RODRIGO CORREA

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

2004

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	21
1. OBJETIVOS	24
1.1. OBJETIVO GENERAL	24
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	24
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
3. LOGROS.....	27
4. SISTEMA DE SEGURIDAD: “DETECTOR DE FUGAS PARA MICROONDAS”	29
4.1. NOCIONES BASICAS DE SEGURIDAD	29
4.2. FOTODETECTORES.....	31
4.2.1. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO EN LOS FOTODETECTORES.....	33
4.2.1.1. Respuesta Espectral.....	33
4.2.1.2. Eficiencia Cuántica (η).....	33
4.2.1.3. Sensibilidad (S).....	34
4.2.1.4. Potencia Equivalente de Ruido (NEP).....	36
4.2.1.5. Tiempo de Respuesta	36
4.3. PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	37
4.3.1. MODO FOTOVOLTAICO.....	38
4.4. HARDWARE Y FUNCIONAMIENTO (DETECTOR FUGAS).....	41
4.4.1. HARDWARE DEL DETECTOR DE FUGAS	41
4.4.2. FUNCIONAMIENTO DEL DETECTOR DE FUGAS	43
4.4.2.1. Fuente de Alimentación	43
4.4.2.2. Sensado, Alta impedancia y amplificación.....	43
4.4.2.3. Filtrado	50
4.4.2.4. Niveles de Comparación e Indicaciones Visuales y Sonoras.....	51
4.4.2.5. Salidas TTL.....	52
5. SENSORES DE TEMPERATURA POR MEDIO DE FIBRA ÓPTICA	55
5.1. SENSORES DE TEMPERATURA FOT-L.....	56
5.2. ACONDICIONADOR DE SENAL PARA SENSORES DE FIBRA OPTICA UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT).....	58
5.3. MEDICIÓN DE LOS DATOS	60
5.3.1. DATOS MUESTREADOS Y PROMEDIADOS	60
5.4. ESCANEAO AUTOMÁTICO	61
5.5. ESCANEAO MANUAL.....	62
5.6. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	63
5.6.1. ADQUISICIÓN DE DATOS EN MODO DE ESCANEAO MANUAL 63	63
5.6.2. ADQUISICIÓN DE DATOS EN MODO DE ESCANEAO AUTOMÁTICO	64

5.7.	COMUNICACIÓN SERIAL DEL UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT) DE FISO PARA CONFIGURACIÓN, MONITOREO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	66
5.7.1.	GENERALIDADES	66
5.8.	ORGANIZACIÓN DEL SOFTWARE.....	66
5.8.1.	AJUSTE DEL GAUGE FACTOR.....	67
5.8.2.	AJUSTES DE ADQUISICIÓN	68
5.8.3.	MODOS DE ADQUISICIÓN.....	70
5.8.4.	ADMINISTRACION DE MEMORIA Y DESCARGA DE DATOS	72
5.8.5.	CARACTERISTICAS DE PREVENCIÓN DE ERRORES.	73
5.9.	PROGRAMACIÓN EN LABVIEW	75
6.	CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SENSADO DE TEMPERATURA DENTRO DE UNA CAVIDAD CON PRESENCIA DE MICROONDAS.....	78
6.1.	DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.....	78
6.1.1.	SENSOR DE TEMPERATURA TERMOCUPLAS TIPO K	79
6.1.2.	ACONDICIONADOR DE SEÑAL.....	80
6.1.3.	ETAPA DE AISLAMIENTO	81
6.1.4.	FILTRADO	82
6.1.5.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN	83
6.1.6.	CONTROL DE ENCENDIDO Y APAGADO DEL MAGNETRÓN	84
6.1.7.	CONTROL DE HABILITACIÓN DE LA TERMOCUPLA	85
6.1.8.	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	86
6.2.	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	87
6.2.1.	SELECCIÓN DE TIEMPOS DEL PROCESO	90
6.2.1.1.	Duración total del proceso	90
6.2.1.2.	Duración Del Sensado.....	91
6.2.2.	SELECCIÓN DE TIEMPOS DE SENSADO	92
6.2.2.1.	Tiempos Homogéneos.....	93
6.2.2.2.	Tiempos Escogidos	94
6.2.3.	TEMPERATURA MÁXIMA.....	95
6.2.4.	VISUALIZACIÓN DE LA TEMPERATURA	95
6.3.	FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO.....	97
7.	DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE SENSADO DE TEMPERATURA POR MEDIO DE TERMOCUPLA EN UNA CAVIDAD ELECTROMAGNÉTICA.....	103
7.1.	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PARA CALIBRACIÓN.....	103
7.2.	PRUEBAS DE CALIBRACIÓN	107
7.2.1.	EQUIPOS DE CALENTAMIENTO	109
7.2.1.1.	Horno Microondas:	109
7.2.1.2.	Plancha de Calentamiento.....	110
7.2.2.	PRUEBAS A TEMPERATURA VARIABLE.....	111
7.2.2.1.	Metodología para las Pruebas Utilizando como Medio de Calentamiento una Plancha Térmica:	111
7.2.2.2.	Metodología para las Pruebas Utilizando como Medio de Calentamiento un horno Microondas:.....	112

7.2.2.3.	Resultados De Las Pruebas Con Temperatura Variable Utilizando Como Medio Calentador Una Plancha Térmica	113
7.2.2.4.	Resultados de las Pruebas en Presencia de Campos Electromagnéticos	117
7.2.3.	PRUEBAS A TEMPERATURA AMBIENTE.....	121
7.2.3.1.	Descripción de la Metodología Utilizada para el Desarrollo de las Pruebas con Temperaturas Ambiente.....	121
7.2.3.2.	Resultados de las Pruebas a Temperatura Ambiente	121
7.3.	COMPORTAMIENTO DE LAS TERMOCUPLAS AL SER SOMETIDAS A RADIACIÓN DE MICROONDAS.	124
7.3.1.	TERMOCUPLA EN EL INTERIOR DE LA CAVIDAD PERO FUERA DE LA MUESTRA.....	125
7.3.2.	TERMOCUPLA EN EL INTERIOR DE LA CAVIDAD Y EN EL INTERIOR DE LA MUESTRA	129
7.3.3.	TERMOCUPLA EN EL INTERIOR DE LA MUESTRA, SIENDO ÉSTA UNA DE LAS PAREDES DE LA CAVIDAD.	131
7.4.	VISUALIZACIÓN DE DATOS CONFIABLES	134
8.	COMPORTAMIENTO TERMICO DE MUESTRAS DE PAVIMENTO AL SER CALENTADAS POR MEDIO DE MICROONDAS EN UNA CAVIDAD RESONANTE.....	138
8.1.	ASPECTOS GENERALES	138
8.2.	PARTE EXPERIMENTAL	140
8.2.1.	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	140
8.3.	TIPOS DE PRUEBAS	144
8.4.	METODOLOGÍA Y RESULTADOS	145
8.4.1.	PRUEBAS TIPO UNO	145
8.4.2.	PRUEBAS TIPO DOS.....	152
8.4.2.1	Pruebas Horizontales.....	154
8.4.2.2	Pruebas Verticales.....	157
8.4.3.	PRUEBAS TIPO TRES	161
8.4.4.	PRUEBAS TIPO CUATRO	172
8.4.5.	ANÁLISIS	176
8.4.6.	PRUEBA TIPO CINCO.....	177
9.	COMPORTAMIENTO TERMICO DE UNA MUESTRA DE ASFALTO AL SOMETERLA A RADIACION DE MICROONDAS SIENDO ESTA UNA CARA DE LA CAVIDAD.....	183
9.1.	ASPECTOS GENERALES	183
9.2.	TIPOS Y DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	186
9.2.1.	TIPOS DE PRUEBAS	186
9.2.2.	DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	187
9.2.3.	RESULTADO DE LAS PRUEBAS.....	190
9.2.3.1.	Resultado Prueba Tipo Uno	190
9.2.3.2.	Resultado Prueba Tipo Dos.....	194
9.2.3.3.	Análisis.....	196
9.2.3.4.	Resultado Prueba Tipo Tres	197

9.2.3.5. Análisis.....	200
10. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	
202	
11. BIBLIOGRAFÍA	209

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diodo de Unión pn en equilibrio	37
Figura 2 Fotodiodo irradiado en la unión pn.....	39
Figura 3 Diagrama de Bloque para el Detector de Fugas	42
Figura 4. Respuesta del Fotodetector sin Presencia de Radiación de Microondas	45
Figura 5 Respuesta del diodo fotodetector ante radiación de microondas.....	46
Figura 6. RF STRENGTH METER.....	48
Figura 7. Correspondencia entre la tensión DC generada por el fotodetector y la densidad de potencia registrada con el RF STRENGTH METER.	49
Figura 8. Esquemático para el detector de fugas.....	53
Figura 9. Fotografía detector de fugas	54
Figura 10. Estructura de un sensor de temperatura FOT-L.....	56
Figura 11. Fotografía del sensor de temperatura FOT –L.....	57
Figura 12. Acondicionador de señal UMI para sensores de fibra óptica.	59
Figura 13. Diagrama de tiempos de operación en el modo de escaneo automático....	62
Figura 14. Diagrama de tiempos de adquisición de datos en el modo de escaneo manual.....	64
Figura 15. Diagrama de tiempos de adquisición de datos en el modo de escaneo automático.....	65
Figura 16. Pestaña Ajustes de Gauge Factor.....	68
Figura 17. Pestaña Ajustes de Adquisición.....	69
Figura 18. Pestaña Modos de Adquisición en modo Adquisición Retrasada Normal- Manual	71
Figura 19. Pestaña Modos de Adquisición en modo RS-232/Scan-Automático	72
Figura 20. Pestaña Administración de Memoria y Descarga de Datos.....	73
Figura 21. Advertencia al intentar introducir una configuración inválida.....	75
Figura 22. Diagrama básico del algoritmo en Labview para configuración y adquisición de datos del UMI.	76
Figura 23. Programación en Labview para la obtención y visualización del número serial del UMI a través del puerto serie.	77
Figura 24. Diagrama de bloques de la adquisición y procesamiento de datos de temperatura dentro de un horno microondas.....	79
Figura 25. Diagrama del circuito de acondicionamiento de la señal de termocupla... 81	81
Figura 26. Circuito de aislamiento.....	82
Figura 27. Diagrama del filtro activo pasabajas de cuarto orden.....	83
Figura 28. Circuito de alimentación implementado en el hardware.	84
Figura 29. Circuito de control de encendido y apagado del horno microondas.....	85
Figura 30. Circuito de control de habilitación de la termocupla.....	86
Figura 31. Tarjeta de adquisición de datos PCI-1200.....	87
Figura 32. Diagrama de tiempos de funcionamiento.....	89
Figura 33. Panel frontal del programa de sensado de temperatura.	90
Figura 34. Controles Del Tiempo Total Del Proceso.....	91

Figura 35. Controles de selección de tiempos de sensado, duración de sensado y temperatura máxima.....	92
Figura 36. Menú de selección de tiempos de sensado homogéneos durante el proceso.	93
Figura 37. Menú de selección de tiempos de sensado escogidos por el usuario durante el proceso	94
Figura 38. <i>Display</i> que muestra la temperatura y progreso del proceso.	96
Figura 39. Icono de detalle de la gráfica.	97
Figura 40. Diagrama de flujo para el desarrollado en LabView del sistema de sensado de temperatura con termocupla, cuando se produce calentamiento con microondas.	99
Figura 41. Programación en LabVIEW de comparación de tiempos para habilitar el acceso al sensado	100
Figura 42. Programación en LabView para la realización de sensado de temperatura.	101
Figura 43 Programación en LabVIEW para la realización del encendido del magnetrón.....	102
Figura 44. Etiqueta de Termocupla.....	104
Figura 45. Etiqueta ajustes de adquisición cuando es habilitado pulsador de termocupla.....	106
Figura 46. Etiqueta modo de adquisición cuando es habilitado pulsador de termocupla.....	107
Figura 47. Plancha Térmica	110
Figura 48. Montaje para Realización de Pruebas con Plancha	113
Figura 49. Gráficas correspondientes a la prueba 1 cuando se utiliza como medio de calentamiento una plancha térmica.	114
Figura 50. Gráficas correspondientes a la prueba 2 cuando se utiliza como medio de calentamiento una plancha térmica.	115
Figura 51. Gráficas correspondientes a la prueba 3 cuando se utiliza como medio de calentamiento una plancha térmica.	116
Figura 52. Gráfica para Interpretar Resultados Obtenidos en Pruebas con Presencias de Campos Electromagnéticos.	117
Figura 53. Gráficas correspondientes a la prueba 1 cuando se utiliza como medio de calentamiento un horno microondas.	118
Figura 54. Gráficas correspondientes a la prueba 2 cuando se utiliza como medio de calentamiento un horno microondas.	119
Figura 55. Gráficas correspondientes a la prueba 3 cuando se utiliza como medio de calentamiento un horno microondas.	120
Figura 56. Resultado Prueba 1 a temperatura Ambiente.....	122
Figura 57. Resultado Prueba 2 a temperatura Constante	123
Figura 58. Ubicación del vaso de agua y la termocupla. a) Termocupla entre la fuente de radiación y el vaso de agua. b) vaso de agua entre la termocupla y la fuente de radiación.....	125

Figura 59. Temperaturas alcanzadas por la termocupla con la distribución de la figura 58a. a) Tiempo de exposición 5s. b) Tiempo de exposición 10s. c) Tiempo de exposición 20s. d) Tiempo de exposición 30s e) Tiempo de exposición 40s. ..	126
Figura 60. Temperaturas alcanzadas por la termocupla con la distribución de la figura 58b. a) Tiempo de exposición 20s. b) Tiempo de exposición 40s.	128
Figura 61. Ubicación de la muestra de pavimento en el interior de la cavidad.	129
Figura 62. Efecto de las microondas sobre la termocupla cuando se calienta una muestra de asfalto en el interior de la cavidad.	130
Figura 63. Ubicación de la cavidad sobre la muestra de pavimento.	132
Figura 64. Temperaturas en grados centígrados registradas por medio de termocupla al radiar una muestra que actúa como una de las caras de la cavidad.	133
Figura 65. Variación de la pendiente en la curva de temperatura registrada con termocupla.	135
Figura 66. Opción de los algoritmos desarrollados en labview que permite hacer la visualización de datos confiables después de haber realizado calentamiento con microondas.	136
Figura 67. Curvas de temperatura con y sin ajuste registradas al someter una muestra de pavimento en el interior de la cavidad resonante.	137
Figura 68. Convención utilizada en la cavidad del horno.	139
Figura 69. a) Forma y convención de medida de las muestras, b) muestras, sin corte y cortada, c) superficie del corte.	141
Figura 70. Perforaciones realizadas a las muestras de pavimento.	141
Figura 71. Distribución y numeración de orificios en las muestras utilizadas.	142
Figura 72. Capilares de vidrio usados para proteger los sensores.	143
Figura 73. Ubicación de los sensores en el interior de la muestra. a) Vista de corte en el plano yz de la muestra. b) Vista de la cara superior de la muestra.	143
Figura 74. Ubicación de las muestras de pavimento para las pruebas tipo uno.	145
Figura 75. Destrucción de una muestra usando solo una mano después de someterla a calentamiento con microondas en el interior del horno por un tiempo de 5 minutos.	147
Figura 76. Muestra que causó humaredas; en el interior de las circunferencias punteadas se muestran los lugares afectados.	147
Figura 77. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras <i>pavimento 1</i> y <i>pavimento 3</i> a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 10cm en el eje y de la cavidad.	149
Figura 78. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras <i>pavimento 5</i> y <i>pavimento 6</i> a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 15cm en el eje y de la cavidad.	149
Figura 79. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras <i>pavimento 9</i> y <i>pavimento 10</i> a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 20cm en el eje y de la cavidad.	150
Figura 80. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras <i>pavimento 13</i> y <i>pavimento 14</i> a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 25cm en el eje y de la cavidad.	150

Figura 81. Ubicación de las muestras para las pruebas tipo dos, a) Horizontales, b) Verticales.	152
Figura 82. Temperaturas registradas en el canal uno al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	155
Figura 83. Temperaturas registradas en el canal dos al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	155
Figura 84. Temperaturas registradas en el canal tres al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	156
Figura 85. Temperaturas registradas en el canal cuatro al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	156
Figura 86. Temperaturas registradas en el canal uno al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	158
Figura 87. Temperaturas registradas en el canal dos al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	158
Figura 88. Temperaturas registradas en el canal tres al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	159
Figura 89. Temperaturas registradas en el canal cuatro al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.	159
Figura 90. Ubicación de la muestra para las pruebas tipo tres.	161
Figura 91. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 22 por primera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.	163
Figura 92. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 22 por segunda vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.	164
Figura 93. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 22 por tercera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.	164
Figura 94. Grietas que causan un mayor calentamiento cerca de la perforación.	165
Figura 95. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 22 por cuarta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.	166
Figura 96. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 22 por quinta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.	166

Figura 97. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 22 por sexta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.....	167
Figura 98. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 23 por primera vez a calentamiento inducido por medio de microondas.	168
Figura 99. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 23 por segunda vez a calentamiento inducido por medio de microondas.....	168
Figura 100. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 23 por tercera vez a calentamiento inducido por medio de microondas.....	169
Figura 101. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 23 por cuarta vez a calentamiento inducido por medio de microondas.	169
Figura 102. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 23 por quinta vez a calentamiento inducido por medio de microondas.....	170
Figura 103. Perforación con diámetro mucho mayor al del capilar que causa errores en la medida.	171
Figura 104. Ubicación de la muestra para las pruebas tipo cuatro.....	172
Figura 105. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 24 por primera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 26.53°C.	174
Figura 106. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 24 por segunda vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 31.40°C.	174
Figura 107. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 24 por tercera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 37.82°C.	175
Figura 108. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 24 por cuarta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 40.4°C.	175
Figura 109. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> 24 por quinta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 46.8°C.	176
Figura 110. Cavidad resonante con dos magnetrones. Magnetron 1: Ubicado en la guía de onda propia de la cavidad. Magnetron 2: Magnetron en la guía de onda adicional adaptada a la cavidad.....	178
Figura 111. a) Cavidad utilizada en las pruebas tipo cinco, b) Ubicación de la muestra en el interior de la cavidad. Dimensiones de la cavidad: X = 37.5cm, Y = 36.5cm, Z = 21cm.	179
Figura 112. Orden y ubicación de los sensores en la muestra.	180
Figura 113. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> a calentamiento inducido por medio de microonda con un solo magnetron encendido.	181
Figura 114. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra <i>pavimento</i> a calentamiento inducido por medio de microonda con dos magnetrones encendidos.....	181

Figura 115. Muestra utilizada como cara de la cavidad y ubicación del área sometida a radiación (Vista superior).....	184
Figura 116. Capilares utilizados para proteger los sensores.	185
Figura 117. Ubicación de los sensores en el interior de la muestra.	185
Figura 118. Ubicación de las perforaciones en donde se realizaron las medidas de temperatura.....	187
Figura 119. Posición de la cavidad sobre la muestra. 1) magnetrón en la guía de onda propia de la cavidad. 2) magnetrón en la guía de onda adicional adaptada a la cavidad.	188
Figura 120. Agrupación de puntos por filas para los cuales se realizaron pruebas, y distribución de los canales en cada una de las filas.	189
Figura 121. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 1, utilizando el magnetrón ubicado en la guía de onda propia de la cavidad.....	191
Figura 122. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 2, utilizando el magnetrón ubicado en la guía de onda propia de la cavidad.....	192
Figura 123. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 3, utilizando el magnetrón ubicado en la guía de onda propia de la cavidad.....	193
Figura 124. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 1, utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.....	194
Figura 125. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 2, utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.....	195
Figura 126. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 3, utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.....	196
Figura 127. Porcentajes en que se incremento la velocidad de calentamiento en cada uno de los puntos de medida al utilizar dos magnetrones.	197
Figura 128. Montaje empleado para la realización de la prueba tipo tres, a) Lamina reflectora, b) Laminas para el apantallamiento, c) montaje sin apantallamiento, d) montaje con apantallamiento.	198
Figura 129. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas y apantallando, tomando datos en la fila 2 y utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.....	199
Figura 130. Grietas presentadas en la muestra de pavimento después de ser radiada y alcanzar una temperatura 150 °C.....	200

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límites básicos de seguridad para exposición ocupacional.....	30
Tabla 2. Límites de la SAR para exposición ocupacional (Trabajadores expuestos a RF y Microondas).	30
Tabla 3. Elementos Empleados para el Detector de Fugas	42
Tabla 4. Características del horno microondas utilizado como fuente de radiación...	46
Tabla 5 Características de los sensores de temperatura FOT - L.....	58
Tabla 6 Características Hornos	109
Tabla 7. Características de la Plancha Térmica	110
Tabla 8. Características del horno microondas utilizado en las pruebas.....	139
Tabla 9. Geometría y distribución de orificios de las muestras usadas en las pruebas tipo uno.	146
Tabla 10. Geometría y distribución de orificios de las muestras usadas en las pruebas tipo dos.....	153
Tabla 11. Geometría y distribución de orificios de las muestras usadas en las pruebas tipo Tres.	162
Tabla 12. Geometría y distribución de orificios de la muestra usada en las pruebas tipo cuatro.	173

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. NOCIONES BÁSICAS SOBRE SEGURIDAD.....	211
ANEXO B. HORNOS MICROONADAS.....	228
ANEXO C. INSTRUMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO POR FIBRA ÓPTICA	239
ANEXO D. COMANDOS DE CONTROL DEL UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT) MEDIANTE CONEXIÓN RS-232.....	250

RESUMEN

TÍTULO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE FUGAS DE MICROONDAS PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN TÉRMICA MICROONDAS-PAVIMENTO*

AUTORES

CARLOS ARTURO GIRALDO GUTIERREZ
JESUS GUALDRÓN FLÓREZ
JUAN SEBASTIÁN MÉNDEZ TEJADA**

PALABRAS CLAVES

Universal Multichannel Instrument (UMI), Magnetrón, Microondas, termocupla, fotodetector, fibra óptica.

DESCRIPCIÓN

El estudio de la interacción térmica microondas-pavimento y la aplicación de esta como técnica en el proceso de reparcho de vías, requiere tener en cuenta aspectos de seguridad, sensado de temperatura, y el desarrollo de pruebas de laboratorio para determinar la viabilidad de una implementación de un equipo prototipo. Para esto se desarrollaron dos sistemas permitiendo cubrir las necesidades de seguridad y de sensado de temperatura; también se realizaron pruebas de laboratorio y se obtuvieron los perfiles de temperatura del pavimento cuando es radiado dentro de una cavidad resonante, y cuando el pavimento reemplaza una de las caras de la cavidad con una (1) y dos (2) fuentes de radiación.

En la parte de seguridad se desarrolló un detector de fugas que utiliza como sensor un diodo fotodetector en su modo fotovoltaico, además se desarrolló una tarjeta de acondicionamiento que cuenta con etapas alta impedancia, filtrado, amplificación, comparación con niveles con referencia, visualización y salidas de señales TTL.

La medición de temperatura se realizó empleando sensores de fibra óptica junto con un sistema de acondicionamiento que es el Universal Multichannel Instrument (UMI), con este sistema se obtuvieron los perfiles de temperatura para cada una de las pruebas sobre pavimento; además se implementó una estrategia para medir temperatura por medio de termocupla en el interior de una cavidad de microondas.

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías Físico-mecánicas; Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones; Jaime G Barrero; Rodrigo Correa.

ABSTRACT

TITLE

DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF MEASUREMENT OF TEMPERATURE AND LEAKAGE DETECTION OF MICROWAVES FOR THE STUDY OF THERMAL INTERACTION MICROWAVES-PAVEMENT*

AUTHORS

CARLOS ARTURO GIRALDO GUTIERREZ
JESUS GUALDRÓN FLÓREZ
JUAN SEBASTIÁN MÉNDEZ TEJADA**

KEYWORDS

Universal Multichannel Instrument (UMI), Magnetron, Microwaves, thermocouple, photodetector, optical fiber.

DESCRIPTION

The study of the thermal interaction microwave-pavement and the application of this like technique in the process of arrangement of roads, requires to consider aspects of security, temperature measurement, and the development of tests laboratory to determine the viability of an implementation of an equipment prototype. For this two systems were developed allowing to cover the necessities of security and measurement temperature; also laboratory tests were made and the profiles of temperature of the pavement were obtained when it is radiated within a resonant cavity, and when the pavement replaces one of the faces of the cavity with one (1) and two (2) radiation sources.

In the part of security a leak detector was developed that uses like sensor a photodetector diode in its photovoltaic way, in addition was developed a preparation card that counts on stages high impedance, filtrate, amplification, comparison with levels with reference, visualization and exits of signals TTL.

The measurement of temperature was made using optical fiber sensor along with a conditioning system that is Universal Multichannel Instrument (UMI), with this system were obtained the profiles of temperature for each one of the tests on pavement; in addition was implemented a strategy to measure temperature by means of thermocouple inside of microwave's cavity.

* Final Project

** Physical and Mechanical Engineering Faculty; School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering; Jaime G Barrero; Rodrigo Correa.

INTRODUCCION

El avance tecnológico actual, es desarrollado tanto en el ámbito industrial como en el académico investigativo de las universidades y centros de investigación, en búsqueda de nuevas tecnologías competitivas que se caractericen por la disminución de costos, ahorro en tiempos de operación y por su contribución al mejoramiento de la calidad de vida de la humanidad.

El mantenimiento de la gran malla vial urbana e intermunicipal del país mediante el proceso del reparcho, ha potencializado una creciente demanda de nuevas técnicas y tecnologías que aporten al mejoramiento de dicho proceso, y que se encuentran actualmente en vías de desarrollo. Estas técnicas van desde el cambiar agregados químicos, hasta el diseño e implementación de nuevos prototipos.

Los principales factores que han incidido en el pensamiento para generar nuevas técnicas que permitan desarrollar este proceso de manera más eficiente son: la contaminación ambiental de las actuales técnicas utilizadas y la necesidad de utilizar técnicas sostenibles ecológica y económicamente de manera que aporten al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad en general y especialmente de usuarios y operarios.

Este documento presenta los resultados obtenidos de la investigación realizada sobre el calentamiento de pavimentos por medio de microondas con frecuencia de 2.45GHz, dentro y fuera de una cavidad resonante. También presenta, los tipos de pruebas desarrollados en el transcurso de la investigación, junto con la metodología seguida para el desarrollo de cada una de ellas.

El trabajo se desarrolló bajo los lineamientos de la investigación del grupo *CEMOS*¹ y se enmarcó, dentro de sus líneas de investigación para el desarrollo de estas nuevas tecnologías.

El desarrollo de las pruebas para validar el efecto térmico que presenta el pavimento en presencia de microondas; y la finalidad de esta investigación como parte de un macroproyecto, de implementación de un equipo prototipo para reparcho de vías, tomaron en cuenta ciertos aspectos importantes en el momento del desarrollo de las pruebas y del prototipo: aspectos como la seguridad frente a posibles fugas de radiación, y sensado de temperatura del asfalto entre otros. Se implementó el hardware y el software para cubrir los aspectos de seguridad y sensado de temperatura.

El hardware se centró en un detector de fugas para microondas de 2.45 GHz, junto con un sistema de sensado de temperatura por medio de termocuplas; además se trazó

¹ Control Electrónica Modelado y Simulación

una estrategia de control para poder sensar la temperatura en un ambiente electromagnético agresivo.

En software se desarrolló un algoritmo que permite obtener por medio de un PC la temperatura del sistema de termocuplas, además controlar el equipo de acondicionamiento de señal UMI² que utiliza transductores de fibra óptica para el sensado de la temperatura.

² Universal Multichannel Instrument

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Obtener de forma experimental los perfiles de temperatura del pavimento cuando se somete a radiación de microondas con frecuencia de 2.45 GHz y con potencia de 1200 watts.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Implementar una estrategia de medición junto con un sistema (Hardware y software) que permita el sensado de temperatura por medio de termocupla cuando se trabaja con radiación de microondas.
- Diseñar y construir un detector de fugas para microondas de frecuencia 2.45 GHz.
- Desarrollar un algoritmo que permita la configuración, obtención y/o visualización de datos desde un PC del acondicionador de señal para transductores de fibra óptica para temperatura UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT).

- Desarrollar un algoritmo que permita la contrastación de las medidas efectuadas por el sistema de sensado de temperatura por medio de termocupla con las realizadas por el UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT).
- Realizar pruebas de laboratorio con muestras de pavimento de volúmenes conocidos en el interior de una cavidad resonante (horno microondas convencional), ubicando las muestras en diferentes posiciones para obtener el perfil de temperatura utilizando el UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT).
- Realizar pruebas de laboratorio para observar el calentamiento del pavimento cuando se reemplaza una de las caras de la cavidad resonante por pavimento y se emplea una fuente de radiación con uno (1) y dos (2) magnetrones, utilizando el UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procesos convencionales de reparcho de vías, contribuyen a la contaminación y al deterioro ambiental que ha venido en aumento durante los últimos años. Por otra parte el mejor aprovechamiento de recursos no renovables, la disminución de costos y tiempos en este proceso hacen necesario pensar en formas alternativas para llevarlo a cabo.

El calentamiento de pavimento por medio de microondas como técnica en desarrollo al presentar resultados técnicamente aceptables, se constituye en una técnica sostenible para el reparcho de pavimentos, teniendo en cuenta que mediante su potencial utilización se disminuyen considerablemente los efectos de contaminación ambiental y auditiva ocasionada por la técnica actual; permite la reutilización del pavimento que se encuentra deteriorado, evitando la contaminación por desechos sólidos generados por su actual remoción, se ahorran costos y tiempos de operación, y en términos generales contribuye al mejoramiento de la calidad de vida de la humanidad.

3. LOGROS

La culminación exitosa de este trabajo de grado deja hardware y software, eficiente y de bajo costo, que permite obtener de manera segura perfiles de temperatura de muestras de pavimento cuando son sometidas a radiación de microondas. Además se corroboró la interacción microondas-pavimento dentro y fuera de la cavidad resonante. A continuación se listan los logros de este trabajo de grado:

- Desarrollar e implementar un detector de fugas para microondas de 2.45GHz, el cual indica cuando hay radiación nociva para la salud según los estándares internacionales.
- Implementar de un sistema de sensado de temperatura por medio de termocupla, junto con una estrategia de control para el sensado en ambientes electromagnéticos agresivos (Hardware y Software).
- Desarrollar un algoritmo que permite la configuración, obtención y/o visualización de datos desde un PC del acondicionador de señal para transductores de fibra óptica UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT); evitando la compra del software propietario del acondicionador y representando un ahorro en los costos del proyecto

- Corroborar la interacción de microondas-pavimentos dentro de una cavidad resonante al aumentar el número de fuentes de radiación.
- Comprobar la interacción microondas-pavimento cuando el pavimento es utilizado como una cara de la cavidad resonante; también se comprobó que al aumentar el número de fuentes de radiación (magnetrones) la velocidad de calentamiento del pavimento aumenta.
- Contribuir al fortalecimiento en la línea de investigación en microondas del grupo CEMOS de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, fortaleciendo el trabajo en conjunto entre universidad y empresa para el desarrollo de nuevas tecnologías.

4. SISTEMA DE SEGURIDAD: “DETECTOR DE FUGAS PARA MICROONDAS”

4.1. NOCIONES BASICAS DE SEGURIDAD

Los límites de seguridad han sido clasificados para dos tipos de público expuesto a microondas; uno de ellos el de trabajadores que dentro de sus industrias o lugares de trabajo se encuentran directamente expuestos a la radiación (exposición ocupacional), y el otro grupo lo conforman las demás personas considerado como la población en general (exposición poblacional); en este capítulo se hará énfasis en el grupo de los trabajadores.

Los límites básicos en el rango de frecuencias de los 1500MHz a los 15000MHz que proporcionan las entidades que se han dedicado a estos estudios sobre seguridad³ se relacionan en la tabla 1.

³ ICNIRP *International Commission on No-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time – varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz).*

Tabla 1. Límites básicos de seguridad para exposición ocupacional.

Frecuencia (MHz)	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	<u>Densidad de Potencia</u> (<u>mW/cm²</u>)	Tiempo promedio (min)
1500 – 15000	137	0.364	5	6

Fuente: ICNIRP *International Commission on No-Ionizing Radiation Protection*.

Existe otra medida que se debe tener en cuenta cuando se trabaja a altas frecuencias; la SAR (Specific Absorption Rate) que se define como una medida de la proporción de la energía electromagnética que es absorbida por el cuerpo. La SAR para este caso en el que la frecuencia de trabajo está en el intervalo de los 100KHz-10GHz tiene prioridad sobre las medidas anteriormente mencionadas. En la tabla 2 se presentan los límites de la SAR para exposición ocupacional. El Anexo B presenta con más detalle los parámetros de seguridad cuando se trabaja con microondas.

Tabla 2. Límites de la SAR para exposición ocupacional (Trabajadores expuestos a RF y Microondas).

Condición	Límite de SAR (W/kg)
SAR promedio sobre toda la masa corporal del cuerpo	0.4
SAR promedio local para la cabeza, cuello y tronco sobre cualquier Gramo de tejido	8

Fuente: ICNIRP *International Commission on No-Ionizing Radiation Protection*.

4.2. FOTODETECTORES

En esta sección se presenta el diseño de un detector de fugas para microondas basado en el principio de funcionamiento de los dispositivos optoelectrónicos, los cuales son capaces de transformar señales ópticas en electrónicas o viceversa; es decir, transforman fotones en electrones o electrones en fotones. Un dispositivo de estas características es el utilizado en el sistema diseñado.

En optoelectrónica, los dispositivos de acuerdo a su comportamiento se pueden clasificar en dos grandes grupos: los fotodetectores que convierten una señal óptica en una electrónica tales como fotorresistencias, fotodiodos, fototransistores, células solares, y los emisores que hacen la labor contraria, utilizan la energía de los electrones para emitir fotones. Dentro de los emisores se encuentran los *leds*, láseres, lámparas incandescentes, entre otros.

La elección del dispositivo optoelectrónico depende de su comportamiento en particular y de la aplicación en la que se pretenda utilizar. La aplicación de detección de fugas de microondas se implementó con un fotodetector semiconductor trabajando en modo fotovoltaico, pues su bajo costo, pequeño tamaño, bajos requisitos de energía, junto con su amplio intervalo espectral, una aceptable sensibilidad y su rápida respuesta lo convierten en un fotodetector adecuado para esta aplicación.

Antes de presentar el principio de funcionamiento de los fotodetectores se debe recordar que las microondas hacen parte del espectro electromagnético y que están en el rango de frecuencias que van desde 1GHz hasta los 10GHz, por tanto tienen una energía que es función de su frecuencia y está dada por la ecuación (1).

$$E = h * f \quad (1)$$

Donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la onda. Además, como se trata de la luz, que tiene una velocidad en el vacío $c \approx 3 * 10^8 \frac{m}{s}$ y el tiempo que demora en recorrer una de sus longitudes de onda λ será el periodo de la señal, entonces la relación entre la longitud de onda y la frecuencia de la señal esta dada por la ecuación 2.

$$\lambda = c * T = \frac{c}{f} \quad (2)$$

La anterior ecuación relaciona energía, frecuencia y longitud de onda, de forma que indicar una equivale a indicar las otras. Ya descritas las relaciones internas de las señales ópticas se mostrarán los parámetros de rendimiento y el funcionamiento de los fotodetectores.

4.2.1. PARÁMETROS DE RENDIMIENTO EN LOS FOTODETECTORES

A continuación se presentan algunos de los parámetros más importantes que permiten determinar el rendimiento de un fotodetector y proporcionar información para el diseño e implementación de una aplicación.

4.2.1.1. Respuesta Espectral

Esta característica es importante ya que se está detectando radiación óptica con un ancho de banda que va desde el ultravioleta hasta las microondas, por lo tanto la longitud de onda va a determinar las especificaciones de todos los parámetros de los fotodetectores, es decir, que el pico de la longitud de onda de emisión pueda generar respuesta pico en el fotodetector; esto es importante cuando se desea rendimiento óptimo.

4.2.1.2. Eficiencia Cuántica (η)

La eficiencia cuántica es la medida del número de foto-electrones producidos por cada fotón incidente en la superficie fotosensible. Entonces la eficiencia cuántica estará dada por:

$$\eta = \left(\frac{\eta_e}{\eta_p} \right) * 100\% \quad (3)$$

Donde η_e es la velocidad de generación de fotoelectrones y η_p es la velocidad de fotones incidentes.

4.2.1.3. Sensibilidad (S)

La magnitud de la señal eléctrica de salida de un fotodetector en respuesta a un flujo de luz se expresa en términos de la sensibilidad (S) que es definida como:

$$S = \frac{i_d}{\varphi} \quad (4)$$
$$S = \frac{v_d}{\varphi}$$

Donde i_d o v_d es la señal eléctrica de salida y φ es el flujo de radiación incidente.

La corriente producida por los fotones (i_{fot}) se puede deducir considerando el efecto producido en un fotodetector al someterlo a radiación de una longitud de onda (λ) determinada. La velocidad de los fotones incidentes que llegan al fotodetector se define como el cociente entre el flujo luminoso total φ y la energía de un fotón (E_{fot}), obteniéndose la siguiente relación:

$$\eta_p = \frac{\varphi}{E_{\text{fot}}} \quad (5)$$

Utilizando las ecuaciones (1), (3) y (5) se obtiene la velocidad de producción de fotoelectrones, que estará dada por:

$$\eta_e = \frac{\eta\phi\lambda}{hc} \quad (6)$$

Entonces si se combina la velocidad de producción de los fotoelectrones con la carga del electrón q se obtiene la fotocorriente generada (i_{fot}), por lo tanto

$$i_{fot} = \left(\frac{\eta\phi\lambda}{hc} \right) q \quad (7)$$

A partir de la ecuación (4) y (7) se llega a una relación que determina la sensibilidad S de los fotodetectores

$$S = \left(\frac{\eta.\lambda.q}{hc} \right) \quad (8)$$

Las ecuaciones anteriormente mostradas son de utilidad para determinar las relaciones que modelan el comportamiento de los fotodetectores en sus diferentes modos de operación.

4.2.1.4. Potencia Equivalente de Ruido (NEP)

Todos los fotodetectores producen una pequeña señal de salida, incluso en total oscuridad. La presencia de esta señal de ruido establece el límite inferior de la radiación que es posible detectar. Entonces la potencia equivalente de ruido (NEP) se define como el flujo radiante que produce una señal de salida igual en magnitud a la producida a la señal de ruido.

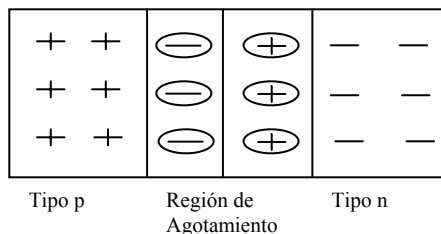
4.2.1.5. Tiempo de Respuesta

Todos los fotodetectores tienen una inercia en su reacción a la radiación incidente. El tiempo de respuesta es una medida de cuánto tiempo requiere un detector para responder a un cambio en la radiación que incide sobre él.

4.3. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El fotodetector utilizado es un diodo pn cuya unión está expuesta a radiación electromagnética incidente. En condiciones de equilibrio, es decir, sin radiación o potencial externo aplicado, existe una barrera de potencial (región de agotamiento) o campo eléctrico a cada lado de la unión pn que impide la difusión de los portadores mayoritarios a través de la unión (figura 1), excepto para una pequeña cantidad de portadores mayoritarios cuya energía es mayor que la de la barrera. Esta pequeña cantidad de portadores mayoritarios son equilibrados por una cantidad igual de portadores minoritarios de deriva, los cuales son generados térmicamente. El resultado de este equilibrio es que a través del diodo no hay flujo de corriente porque la corriente producida por los portadores mayoritarios, es decir, de p a n es anulada por la corriente de los portadores minoritarios de n a p.

Figura 1 Diodo de Unión pn en equilibrio



Fuente: Autores

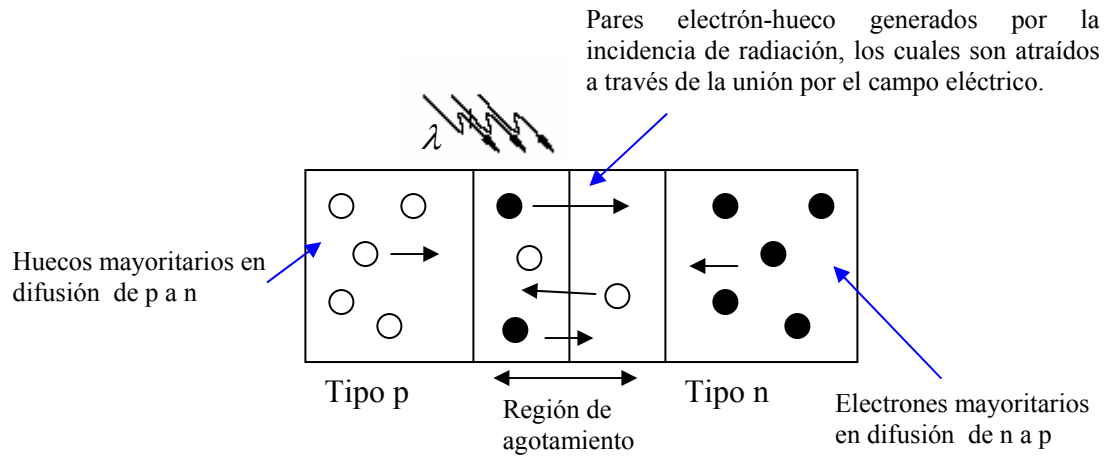
Al someter el diodo a radiación electromagnética se crean pares electrón-hueco en la región de agotamiento, perturbando el equilibrio existente. Los electrones son

atraídos hacia la banda de conducción del tipo n y los huecos hacia la banda de valencia del tipo p; debido a esta generación de pares electrón-hueco existen dos modos de operación para el diodo fotodetector, el modo fotovoltaico en el cual el diodo está en circuito abierto y no se le aplica tensión; y el modo fotoconductor, en donde al diodo fotodetector le es aplicada una tensión invertida. Para efectos del presente trabajo de grado será analizado el modo fotovoltaico, puesto que este modo fue el utilizado en la implementación del detector de fugas.

4.3.1. MODO FOTOVOLTAICO

En este modo de operación el diodo se encuentra en circuito abierto. Dado que el diodo está en circuito abierto no habrá circulación de corriente. Al radiar la región de agotamiento se inyectan portadores minoritarios provocando pares electrón-hueco que son atraídos por el campo eléctrico, dado que los electrones son atraídos al lado n y los huecos son atraídos al lado p se genera una corriente de deriva o corriente fotoinducida i_{fot} que fluye de n a p. Este comportamiento hace que la barrera de potencial se reduzca, permitiendo que los portadores mayoritarios por exceso de energía sean capaces de pasar la unión, es decir, los electrones cruzan de n a p y los huecos de p a n generando una corriente de difusión i_d a través del diodo (figura 2).

Figura 2 Fotodiodo irradiado en la unión pn



Fuente: Autores

Dado que el diodo se encuentra en circuito abierto la corriente fotoinducida i_{fot} debe ser igual a la corriente de difusión i_d dando como resultado una corriente neta igual a cero; entonces, la caída en la barrera de potencial es vista como un voltaje en los extremos del diodo, este voltaje es conocido como **potencial fotovoltaico**.

La corriente que fluye a través del diodo estará dada como la diferencia entre la corriente de difusión i_d y la fotocorriente i_{fot} , la cual debe ser cero. Entonces se tiene:

$$i_t = i_d - i_{fot} = 0 \quad (9)$$

La corriente de difusión i_d se expresa mediante la ecuación del diodo.

$$i_d = i_s * e^{\frac{qv_{fot}}{kT}} - 1 \quad (10)$$

Suponiendo el término exponencial mucho mayor que 1, y reemplazando la ecuación (10) en (9) se llega a que el potencial fotovoltaico estará dado por:

$$v_{fot} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{i_{fot}}{i_s}\right) \quad (11)$$

En el apartado anterior se mostró la equivalencia para i_{fot} en la ecuación (7).

Combinando la ecuación (7) y la ecuación (11) se obtiene la relación final para el potencial fotovoltaico (v_{fot}).

$$v_{fot} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{\eta\phi\lambda q}{i_s hc}\right) \quad (12)$$

De la anterior ecuación se puede ver que la relación que existe entre la radiación incidente y la señal de salida es no lineal. Esta característica es útil para la detección de fugas de microondas porque pequeñas variaciones en la radiación incidente provocarán una gran variación de tensión en los terminales del fotodetector.

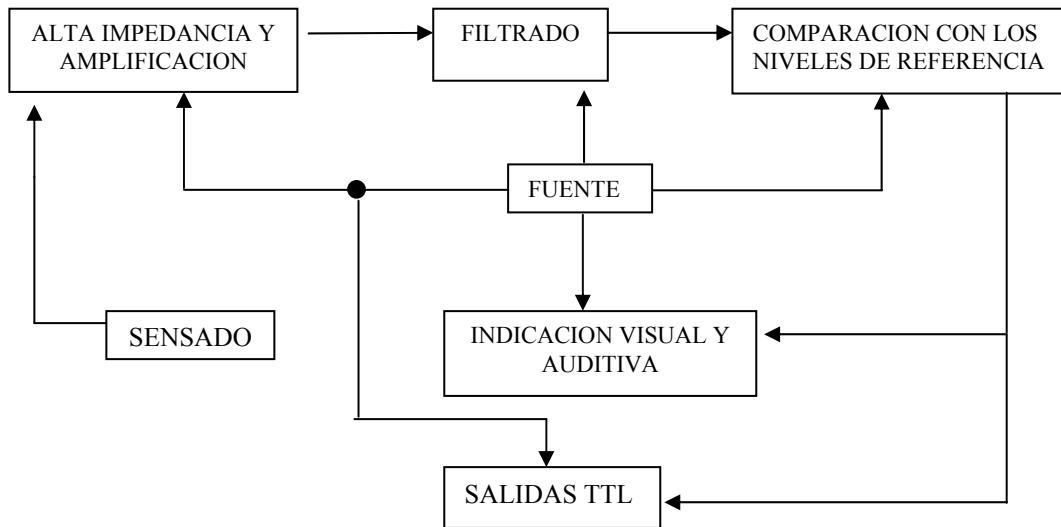
4.4. HARDWARE Y FUNCIONAMIENTO (DETECTOR FUGAS)

4.4.1. HARDWARE DEL DETECTOR DE FUGAS

El diseño del detector de fugas, es un diseño modular donde se tienen en cuenta los aspectos necesarios para su propósito final: la integración con el equipo de prototipo de reparcho de vías. Por tanto, este equipo puede operar como un sistema independiente o integrarse a un sistema central de control; para este fin se acondicionaron algunas etapas como las salidas TTL y la posibilidad de alimentar entre un rango dinámico de tensión.

El detector de fugas implementado cuenta con etapas de sensado, alta impedancia, filtrado, amplificación, comparación con niveles con referencia, visualización y salidas de señales TTL; estas etapas son integradas según el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.

Figura 3 Diagrama de Bloque para el Detector de Fugas



Fuente: Autores

En la tabla 3 se relaciona cada etapa con el correspondiente elemento utilizado para su implementación.

Tabla 3. Elementos Empleados para el Detector de Fugas

Etapa	Elemento	Descripción
Sensado	ECG –109	Diodo de Germanio, encapsulado de cristal.
Alta Impedancia y preamplificación	AD620AN (Analog Device)	Amplificador de instrumentación
Filtrado	OPA 4131 (Burn Brown)	Amplificadores Operacionales
Comparación con niveles de referencia	OPA 4131 (Burn Brown)	Amplificadores Operacionales
Salidas TTL	74LS04N, 2N2222	Inversores, Transistores

Fuente: Autores

4.4.2. FUNCIONAMIENTO DEL DETECTOR DE FUGAS

A continuación se presenta la descripción de cada una de las etapas del detector.

4.4.2.1. Fuente de Alimentación

El diseño del detector de fugas es flexible pensando en sus posibles aplicaciones (sistema independiente o como un subsistema), este se encuentra implementado para ser alimentado con una fuente entre 9 y 15 V.

4.4.2.2. Sensado, Alta impedancia y amplificación

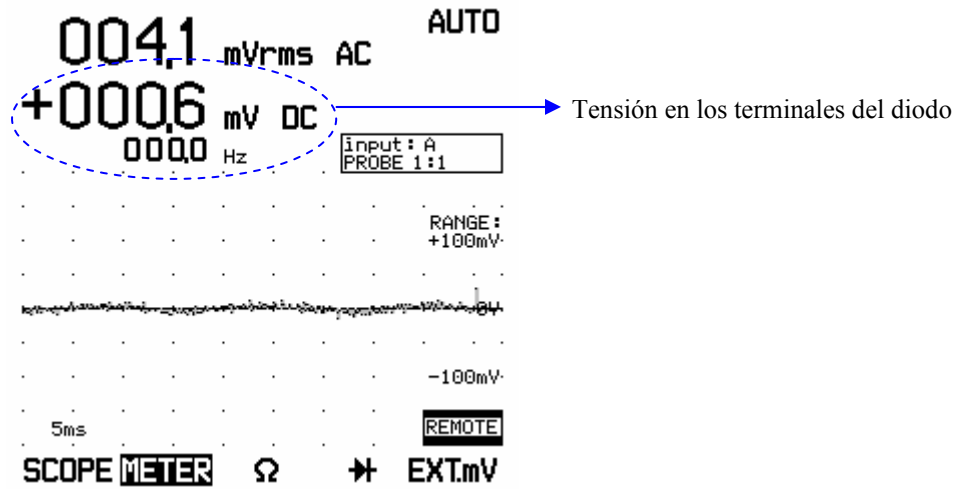
El sensor que compone esta etapa es un diodo fotodetector ECG 109 operando en el modo fotovoltaico, este fotodetector es utilizado en aplicaciones de televisión y radio, posee características de baja corriente de deriva, alta resistencia mecánica y bajas capacitancias parásitas.

Esta etapa es la más importante en el sistema de detección de fugas; para obtener un buen desempeño se hace necesario caracterizar el fotodetector a utilizar. Para este fin se realizaron dos tipos de pruebas: una sin presencia de radiación de microondas y otra en presencia de radiación de microondas.

En primera medida se realizó una prueba sin presencia de radiación de microondas, para establecer y determinar el comportamiento del fotodetector, es decir, conocer la potencia equivalente de ruido (NEP). Se realizaron pruebas al fotodetector en presencia de luz visible y en la oscuridad, para determinar un límite inferior o señal de referencia para la detección. La tensión DC generada por el fotodetector al estar expuesto únicamente a luz visible es aproximadamente de 10mV; esta tensión se reduce aproximadamente a 1mV cuando el fotodetector es llevado a total oscuridad al forrarlo con cinta aislante negra; fue necesario establecer estos límites para discriminar entre la tensión inducida por otras radiaciones y la inducida por radiación de microondas.

La forma de onda obtenida usando un FLUKE 105 de los terminales del diodo cuando este no se encuentra en presencia de microondas se muestra en la figura 4, así como la magnitud de la componente DC de esta señal.

Figura 4. Respuesta del Fotodetector sin Presencia de Radiación de Microondas



Fuente: Autores

Ya conocidos los parámetros de interés del fotodetector sin presencia de radiación de microondas, se procedió a realizar las pruebas en presencia de radiación de microondas.

Para realizar estas pruebas se necesita una fuente de radiación de microondas. La fuente utilizada en esta prueba fue un horno microondas convencional cuyas características se presentan en la tabla 4; este horno presenta fugas de radiación dado que fueron modificadas algunas características de su cavidad.

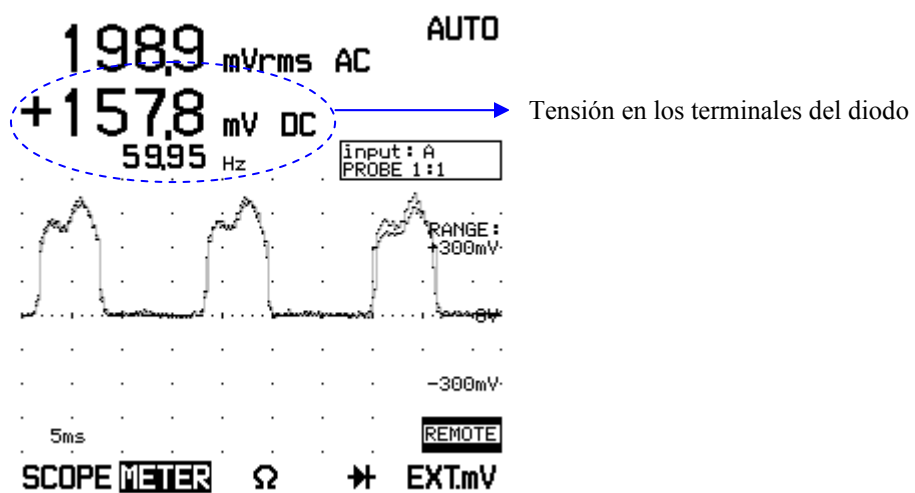
Tabla 4. Características del horno microondas utilizado como fuente de radiación

Característica	Horno 1
Marca	Daewoo KOR-867B
Potencia de Magnetron	900 w
Cavidad	29.4cm*49.5cm*41cm
Fotografia	

Fuente: Autores

Con la fuente de radiación de microondas encendida fue expuesto el fotodetector, presentando una respuesta como la mostrada en la figura 5.

Figura 5 Respuesta del diodo fotodetector ante radiación de microondas



Fuente: Autores

La gráfica de esta señal aporta información importante para el acondicionamiento posterior, es decir, para las etapas de filtrado y amplificación de dicha señal.

En la figura 5 se aprecia la señal generada por el fotodetector y la magnitud de la componente DC cuando hay presencia de radiación de microondas. Es importante notar que es mayor la magnitud de la componente DC cuando el diodo es expuesto a radiación de microondas que cuando no hay radiación de este tipo; esta es la señal de interés en el detector de fugas. También es de resaltar que la magnitud de dicha señal varía en función de la distancia, es decir, a mayor distancia entre el fotodetector y la fuente de radiación, la magnitud de la señal generada disminuye.

Los niveles de radiación que se consideran seguros o peligrosos están dados por las normas internacionales para el trabajo con radiación no ionizante⁴; la calibración del detector de fugas se hace tomando como parámetro de referencia la densidad de potencia, que esta especificada como segura para valores menores a $5\text{mW}/\text{cm}^2$. el equipo patrón utilizado para la calibración fue el RF FIELD STRENGTH METER⁵ (figura 6) el cual mide densidad de potencia.

⁴ Los niveles de radiación seguros y nocivos de microondas se encuentran en el Anexo A.

⁵ Adquisición en convenio CORASFALTOS-UIS-SENA

Figura 6. RF STRENGTH METER



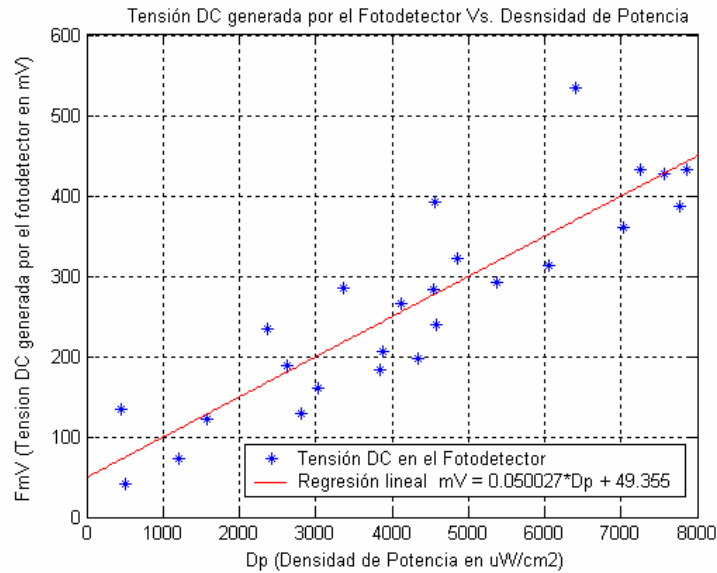
Fuente: http://www.trifield.com/rf_meter.htm

Con el empleo del RF STRENGTH METER se determinó de manera experimental la correspondencia entre la tensión generada por el fotodetector y la densidad de potencia (figura 7); debido a características del medidor de densidad de potencia, la lectura obtenida se debe multiplicar por cuatro cuando se miden microondas⁶.

Las pruebas se realizaron tomando 10 datos a diferentes distancias de la puerta del horno; estos datos fueron promediados para finalmente obtener la gráfica presentada en la figura 7.

⁶ Características del RS STRENGTH METER en http://www.trifield.com/rf_meter.htm.

Figura 7. Correspondencia entre la tensión DC generada por el fotodetector y la densidad de potencia registrada con el RF STRENGTH METER.



Fuente: Autores

La correspondencia entre tensión generada y densidad de potencia fue aproximada por medio de regresión lineal y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$FmV = 0.050027 * Dp + 49.35 \quad (13)$$

Donde FmV es la tensión en milivoltios generada por el fotodetector y Dp es la densidad de potencia en $\mu W/cm^2$. En esta prueba de calibración existieron distancias donde el límite de seguridad fue superado, para calibrar se tomó un valor Dp inferior al establecido por la norma de seguridad; es de advertir que la realización de una

prueba a puerta abierta, es de alto riesgo para la vida humana dado que los niveles de radiación superan en gran medida a los establecidos como seguros.

Como complemento a la etapa de sensado, se encuentran las etapas de alta impedancia y Amplificación, las cuales constan de un amplificador de instrumentación AD620AN. El uso de un amplificador de instrumentación es necesario para garantizar que el fotodetector opere en modo fotovoltaico dada su alta impedancia de entrada; además se aprovechan características como el alto rechazo en modo común.

4.4.2.3. Filtrado

Ya amplificada la señal del fotodetector fue necesario diseñar un filtro pasa bajas que elimine ruido y la componente de 60Hz presente en el ambiente. El filtro implementado es de cuarto orden con frecuencia de corte de 1Hz. No se escoge una frecuencia de corte menor porque los valores de las resistencias y de los condensadores se incrementan, de tal forma que las constantes de tiempo harían que el sistema fuese relativamente lento. Además el filtro posee una ganancia de amplificación de 2.57 V/V, haciendo que la amplificación total del sistema sea el producto de esta por la ganancia del AD620AN, teniendo así, una ganancia total representada por la ecuación 13:

$$G_T = (1 + 49.4k/R_G) * 2.57 \text{ V/V} \quad (14)$$

Donde G_T es la ganancia total del sistema y R_G es la resistencia que controla la ganancia del AD620AN.

4.4.2.4. Niveles de Comparación e Indicaciones Visuales y Sonoras

Acondicionada la señal en las etapas de amplificación y filtrado, se compara con niveles de tensión determinados a partir de las pruebas realizadas al fotodetector en la etapa de sensado; uno de ellos indica que existe radiación pero es seguro seguir operando (nivel inferior), y el otro por el contrario muestra que hay radiación pero es inseguro continuar operando (nivel superior), estos niveles fueron definidos a $2000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ y $4000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ respectivamente; las tensiones correspondientes a los niveles dados en términos de la densidad de potencia se calcularon de acuerdo a la ecuación 13, obteniendo 149mV para el nivel inferior y 249mV para el nivel superior; estos niveles de tensión son de la componente DC de la señal entregada por el fotodetector. Como la comparación se realiza con la señal acondicionada, los niveles deben multiplicarse por la ganancia total del sistema para obtener los verdaderos niveles de comparación.

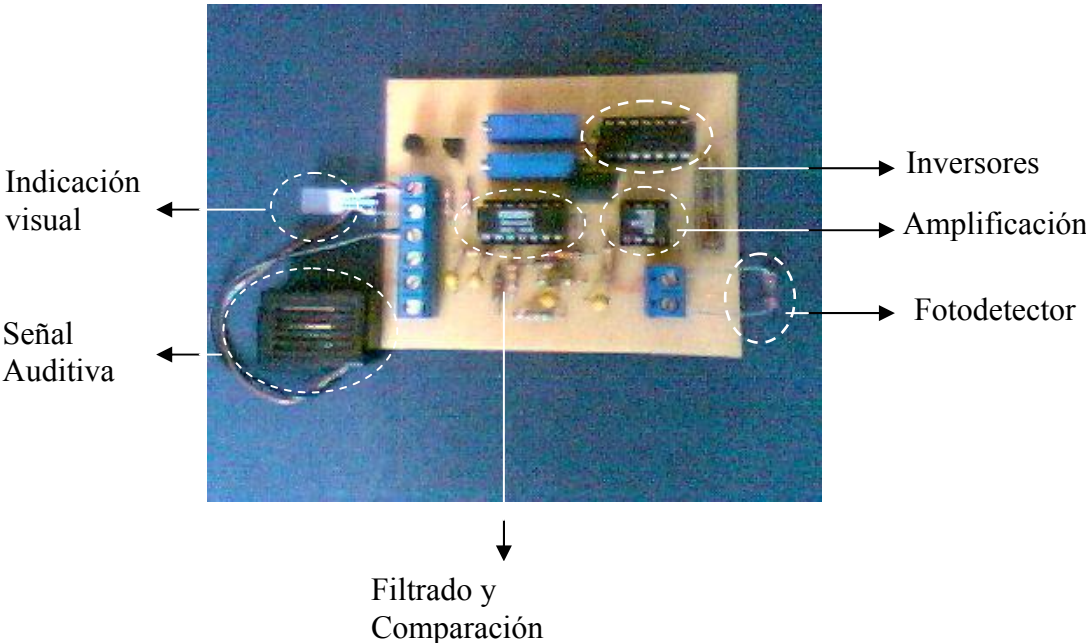
Para cada nivel de comparación se ha establecido una señal de visualización, cuando se alcanza el nivel inferior se visualiza por medio de una luz verde y cuando se llega al nivel superior se visualiza por medio de una luz roja y una señal auditiva.

4.4.2.5. Salidas TTL

Como se mencionó al inicio de este apartado, el sistema se diseñó tomando en cuenta necesidades que se puedan presentar en el momento de ser integrado con el sistema central que operará el equipo prototipo de reparcho. Las salidas TTL permitirán al sistema central de control del equipo de reparcho estar en comunicación con el detector de fugas, podrá estar indagando constantemente sobre el estado del detector, y dependiendo de la estrategia de seguridad trazada para el equipo prototipo podría dar una orden de desenergizar el equipo por completo si hay fugas peligrosas para el operario.

Ya descritas todas las etapas que componen el detector de fugas se presenta todo el esquemático y una imagen del prototipo final en las figuras 8 y 9, respectivamente.

Figura 9. Fotografía detector de fugas



Fuente: Autores

5. SENSORES DE TEMPERATURA POR MEDIO DE FIBRA ÓPTICA

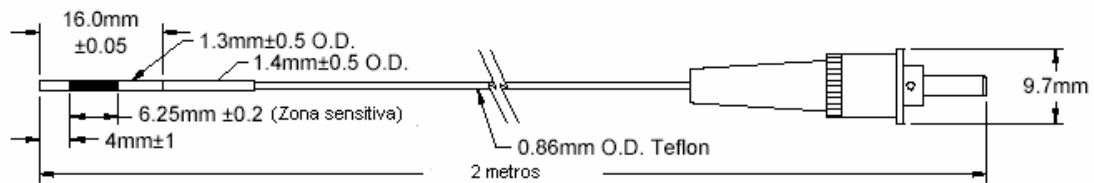
La medición de temperatura presenta diferentes retos cuando se utilizan métodos convencionales en ambientes con presencia de radiación electromagnética, por ello surgen sensores basados en fibra óptica que por medio de luz determinan temperatura en ambientes con o sin radiación a través de una unidad de acondicionamiento. Estos tipos de sensores y equipos de acondicionamiento resultan útiles para los experimentos de calentamiento de pavimentos por medio de radiación de microondas al no verse afectados por tal tipo de radiación, permitiendo registrar la temperatura en todo momento durante el proceso de calentamiento.

En este capítulo se presentan las principales características de los sensores de temperatura por medio de fibra óptica, así como las características del acondicionador de estos sensores que es el UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT); equipo que fue adquirido en convenio de CORASFALTOS-UIS-SENA, que tuvo un costo de veintiun millones de pesos (\$ 21'000.000).

5.1. SENSORES DE TEMPERATURA FOT-L

Los transductores de temperatura FOT-L⁷ fueron la clase de sensores de fibra óptica trabajados en este proyecto. El transductor FOT-L combina características especiales tales como inmunidad a interferencias electromagnéticas e interferencias de radiofrecuencia y microondas; presenta tamaño reducido y compacto como se puede observar en la figura 10 (diámetros externos menores a 1.4mm) y la fotografía en la figura 11. Además posee, resistencia a ambientes altamente corrosivos, posee alta confiabilidad y precisión permitiéndole ser una importante herramienta de medición en ambientes de alta peligrosidad.

Figura 10. Estructura de un sensor de temperatura FOT-L.



Fuente: FOT-L Datasheet.

⁷ Sensores de temperatura de fibra óptica desarrollados por FISO Technologies. www.fiso.com

Figura 11. Fotografía del sensor de temperatura FOT -L



Fuente: Autores

El modelo FOT-L está cubierto y protegido por teflón y posee un rango de medición de temperatura de -40°C a 250°C . Los sensores FOT-L están basados en la expansión térmica de un cristal altamente estable, que garantizan medidas de temperatura fiables. A través de la correlación cruzada para luz blanca, las unidades acondicionadoras son capaces de medir la longitud de la cavidad de los transductores que utilizan tecnología Fabry-Perot⁸ como es el caso del modelo FOT-L, garantizando alta precisión y confiabilidad en las medidas.

Las principales características del transductor de temperatura de Fibra óptica FOT-L se muestran en la tabla 5.

⁸ Fabry-Perot corresponde a al principio con que operan los sensores de fibra óptica este principio es explicado en el anexo C.

Tabla 5 Características de los sensores de temperatura FOT - L

Rango de temperatura	-40 a 250 ° C
Tiempo de respuesta	Menos de 1.5 segundos
Susceptibilidad a EMI/RMI	Inmunidad intrínseca
Longitud del cable de fibra	2 metros.
Revestimiento	Teflón
Precisión / Repetibilidad	± 1 °C a escala completa
Dimensiones de la sonda	1.4 mm de diámetro (Zona sensitiva 6.25 mm longitud)
Valor Sensor FOT-L	US\$ 249.00 ⁹

Fuente: FOT-L Datasheet

5.2. ACONDICIONADOR DE SENAL PARA SENSORES DE FIBRA OPTICA UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT).

El UMI es un acondicionador universal de señal multi-canal para transductores de fibra óptica el cual se muestra en la figura 12. Puede ser utilizado con diferentes transductores de fibra óptica para ejecutar medidas de fuerza, temperatura, carga, desplazamiento y presión en ambientes hostiles que eran antiguamente inaccesibles con otros instrumentos de medida. El acondicionador UMI posee una resolución de 14 bits con un rango relativo dinámico de 15000:1. La resolución y la salida a escala total dependen del tipo de sensibilidad de los transductores usados con el UMI. Entre otras características del UMI se pueden resaltar promediado de datos, registro de

⁹ Este valor corresponde a una sola sonda de temperatura.

datos, adquisición de datos directa por computador o almacenada en memoria, entre otras.

Figura 12. Acondicionador de señal UMI para sensores de fibra óptica.



Fuente: UMI Signal Conditioner Datasheet.

El acondicionador de señal está diseñado para realizar medidas multi-canales de gran precisión aproximadamente 0.1°C . El sistema puede escanear a través de todos los canales en un tiempo de 0.25 s, u obtener muestras a través de un canal en específico a una tasa de 20Hz.

Como características fundamentales el UMI posee 4 canales donde se conectan los transductores, además posee 4 salidas analógicas de $\pm 10 \text{ V}$ que suministran voltajes proporcionales a la temperatura medida en cada canal, permitiendo el monitoreo por computador o por tarjetas de adquisición de datos. Además cuenta con una memoria no volátil que almacena hasta 50000 datos.

El modo de operación del UMI se puede realizar de dos maneras: directamente desde el panel frontal o a través del computador por medio de comunicación RS-232. Posee promedio de muestras que va de una a 500 muestras promediadas.

5.3. MEDICIÓN DE LOS DATOS

5.3.1. DATOS MUESTREADOS Y PROMEDIADOS

El UMI hace un muestreo de la señal presente en cada canal activo a una velocidad fija de muestreo de 20 Hz. Consecuentemente el proceso de acondicionamiento de la señal muestreada desde el transductor, genera un dato de lectura cada 0.05 segundos. Los datos generados a esta frecuencia pueden ser promediados durante un tiempo ajustable por el usuario (Acquisition Average), con el cual se consigue una medición más fiable en los datos.

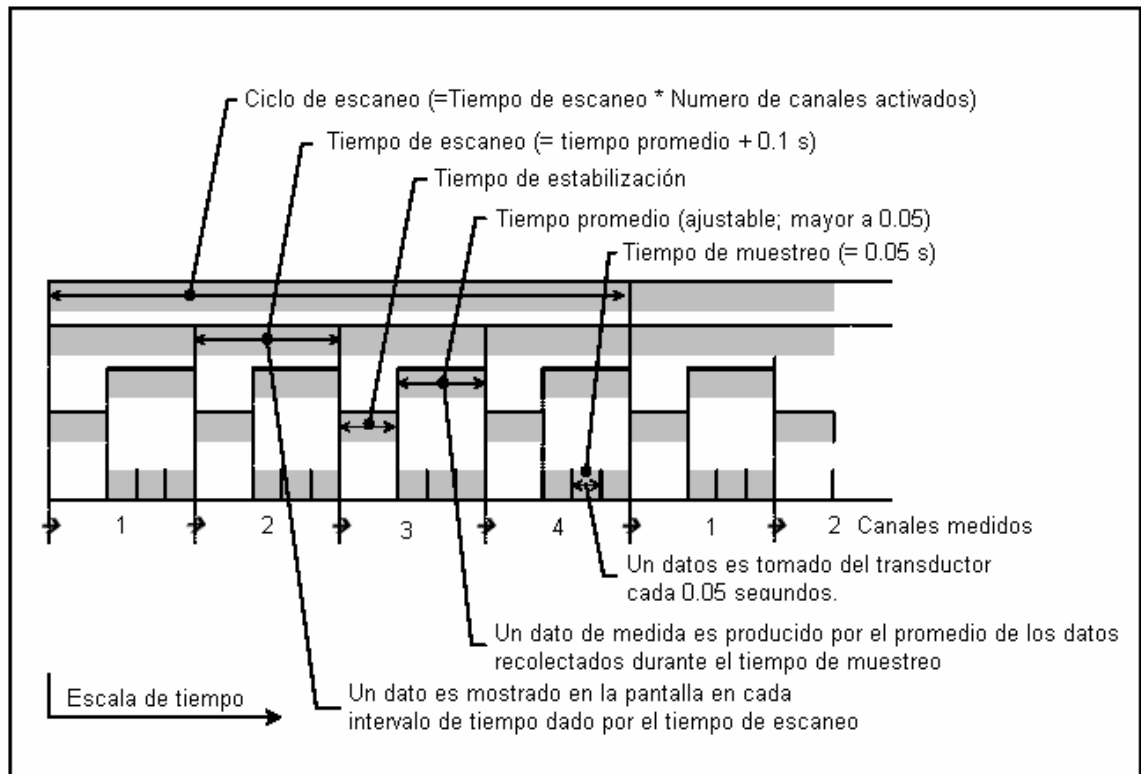
Existen dos formas de medición y escaneo de los datos: Una de forma automática y la otra denominada manual, con las cuales el UMI hace la recolección de los datos de medida.

5.4. ESCANEEO AUTOMÁTICO

Cuando el UMI es puesto en este modo, los datos de medida son tomados secuencialmente en cada uno de los canales activados del UMI. El acondicionador conmuta de un canal a otro en orden ascendente (ej: canal nº 1, 2, 3, 4), y así sucesivamente se repite el ciclo hasta culminar todo el proceso. El tiempo de escaneo (Scanning Time) se define como el tiempo requerido para conmutar a un canal y realizar la adquisición de un dato. Este tiempo es igual al tiempo promedio (*Acquisition average*) más 100ms que tarda la estabilización de la señal (*stabilisation time*); el valor más pequeño de tiempo de escaneo es de 150ms por canal, que es cuando el tiempo promedio (*Acquisition Average*) es puesto a su valor mínimo, el cual es de 0.05 segundos.

En el modo escaneo automático, el intervalo de tiempo entre dos sucesos de medición es igual al tiempo de escaneo. No obstante, el intervalo de tiempo entre dos sucesos de medición de datos para el mismo canal es igual al tiempo de escaneo multiplicado por el número de canales activos, en la figura 13 se muestra el funcionamiento del UMI en el modo de escaneo automático.

Figura 13. Diagrama de tiempos de operación en el modo de escaneo automático.



Fuente: UMI operating manual.

5.5. ESCANEO MANUAL

Cuando el UMI es utilizado en modo manual, los datos medidos son tomados únicamente en un solo canal de medida. En este modo de escaneo, el tiempo entre dos datos medidos consecutivos es igual al tiempo promedio, debido a que no se requiere tiempo de estabilización.

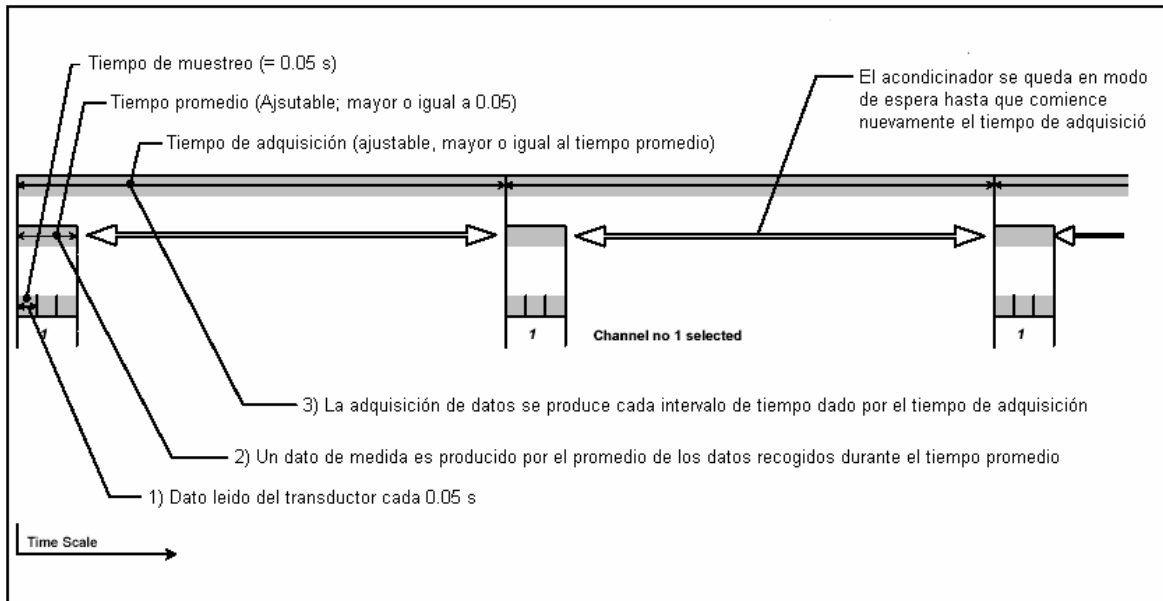
5.6. ADQUISICIÓN DE DATOS

El UMI ofrece dos métodos generales de hacer la adquisición de datos: la adquisición directa y la adquisición retrasada. En adquisición directa cada dato medido es inmediatamente enviado al computador a través de enlace RS-232 del acondicionador, sin almacenarlo en la memoria interna, mientras la adquisición retrasada, todos los datos son almacenados en la memoria buffer del UMI y cuando se desee la información puede ser bajada al computador a través del puerto RS-232.

5.6.1. ADQUISICIÓN DE DATOS EN MODO DE ESCANEEO MANUAL

La adquisición de datos es diferente según el modo en que este operando el UMI, el diagrama de tiempos que se presenta en la figura 14 muestra como se realiza la adquisición de datos cuando el UMI se encuentra en modo de escaneo manual. En este modo de operación, la adquisición de datos consiste en almacenar un dato, cada intervalo de tiempo dado por el parámetro de tiempo de adquisición (Acquisition Rate) que es definido por el usuario. Además debe notarse que la obtención de datos solo se realiza en el intervalo de tiempo dado por parámetro de tiempo de promediado (Acquisition Average) que es ajustado por el usuario. El proceso de promediado inicia al principio del periodo definido por el parámetro de tiempo de adquisición.

Figura 14. Diagrama de tiempos de adquisición de datos en el modo de escaneo manual.



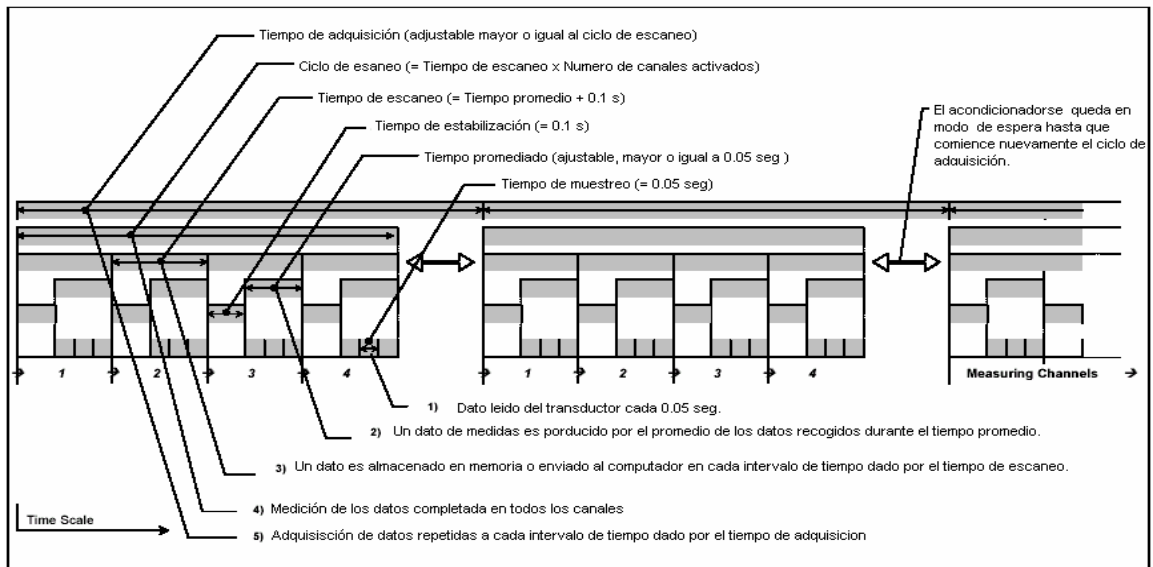
Fuente: UMI operating manual.

5.6.2. ADQUISICIÓN DE DATOS EN MODO DE ESCANEO AUTOMÁTICO

En este modo se hace la adquisición para cada uno de los canales que se encuentren activos durante el intervalo de tiempo dado por el parámetro Duración de Adquisición (Acquisition Duration) que es fijado en el UMI por el usuario; la medida de un canal en particular se da solamente en el tiempo denominado tiempo promedio que incluye tanto el tiempo de estabilización así como el tiempo de muestreo que es igual a 0.05 segundos, un diagrama de tiempos de este tipo de adquisición se presenta en la figura 15. El UMI calcula un valor promedio de los datos recogidos cada 1/20 segundos

durante el tiempo llamado tiempo promedio; este tiempo promedio siempre empieza al comienzo de cada ciclo del tiempo de adquisición.

Figura 15. Diagrama de tiempos de adquisición de datos en el modo de escaneo



automático.

Fuente: UMI Datasheet.

5.7. COMUNICACIÓN SERIAL DEL UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT) DE FISO PARA CONFIGURACIÓN, MONITOREO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

5.7.1. GENERALIDADES

En esta sección se presenta el algoritmo desarrollado por medio de la aplicación Labview©, para realizar monitoreo, registro de temperatura y control del UMI (Universal Multichannel Instrument) a través del puerto RS-232.

Mediante la aplicación desarrollada se realizan acciones como: Adquisición de datos de uno o varios canales con almacenamiento en memoria del UMI (Adquisición de datos retrasada), descarga de datos de adquisiciones almacenadas en memoria, visualización y adquisición datos en tiempo real por medio del puerto RS-232 de uno o varios canales (Adquisición de datos directa), y la configuración de cada uno de los modos de adquisición.

5.8. ORGANIZACIÓN DEL SOFTWARE

El algoritmo se encuentra seccionado en cuatro carpetas, las cuales son: Ajustes Gauge Factor, Ajustes de Adquisición, Modos y Adquisición de Datos, y Administración de Memoria y Descarga de Datos. En éstas podemos visualizar la

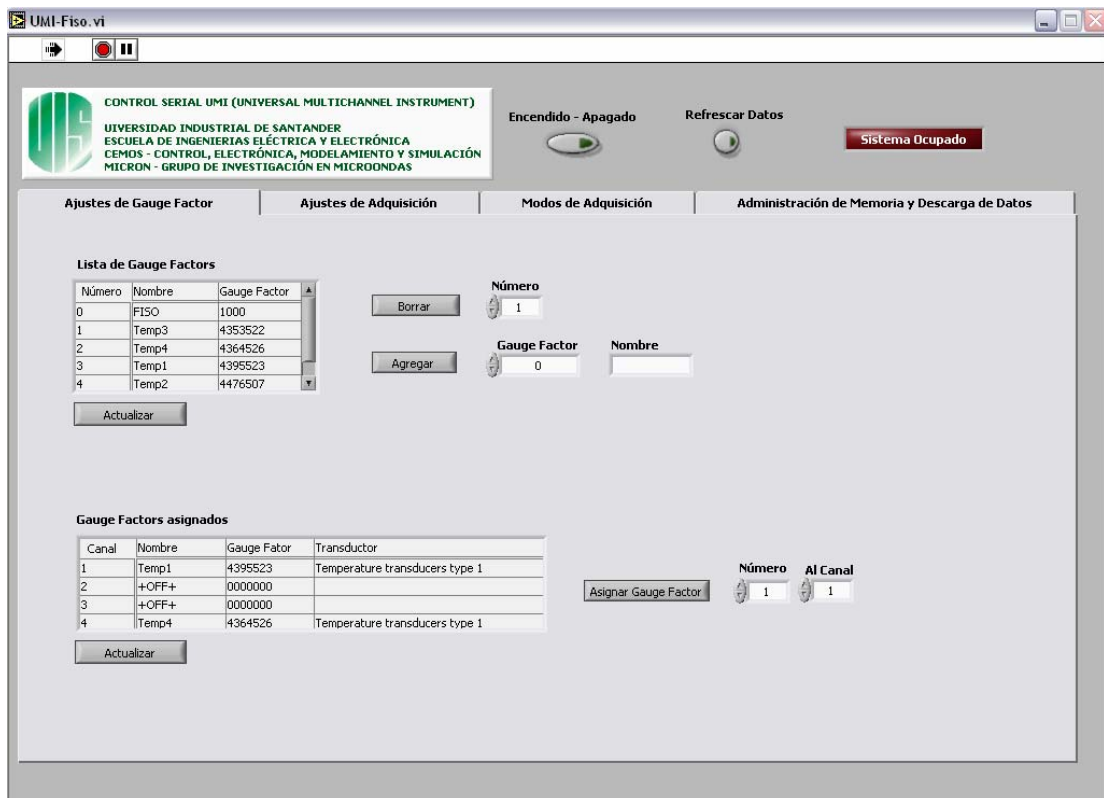
configuración actual del UMI o ajustarla a nuestras necesidades. A continuación veremos cada una de ellas.

5.8.1. AJUSTE DEL GAUGE FACTOR

Cada transductor del UMI tiene asignado un factor de calibración (dado por el fabricante) denominado *Gauge Factor*, el cual le indica al dispositivo que tipo de transductor es (Temperatura, presión, esfuerzo o desplazamiento) y como interpretar la señal que entrega para tomar una medida correcta.

Esta carpeta muestra la lista de *Gauge factors* que esta almacenada en memoria y los que se encuentran asignados a cada canal, además indica que tipo de transductor está asignado. También permite agregar o borrar un *gauge factor* de la lista, y asignar un *gauge factor* de allí a cualquiera de los canales (figura 16).

Figura 16. Pestaña Ajustes de Gauge Factor



Fuente: Autores.

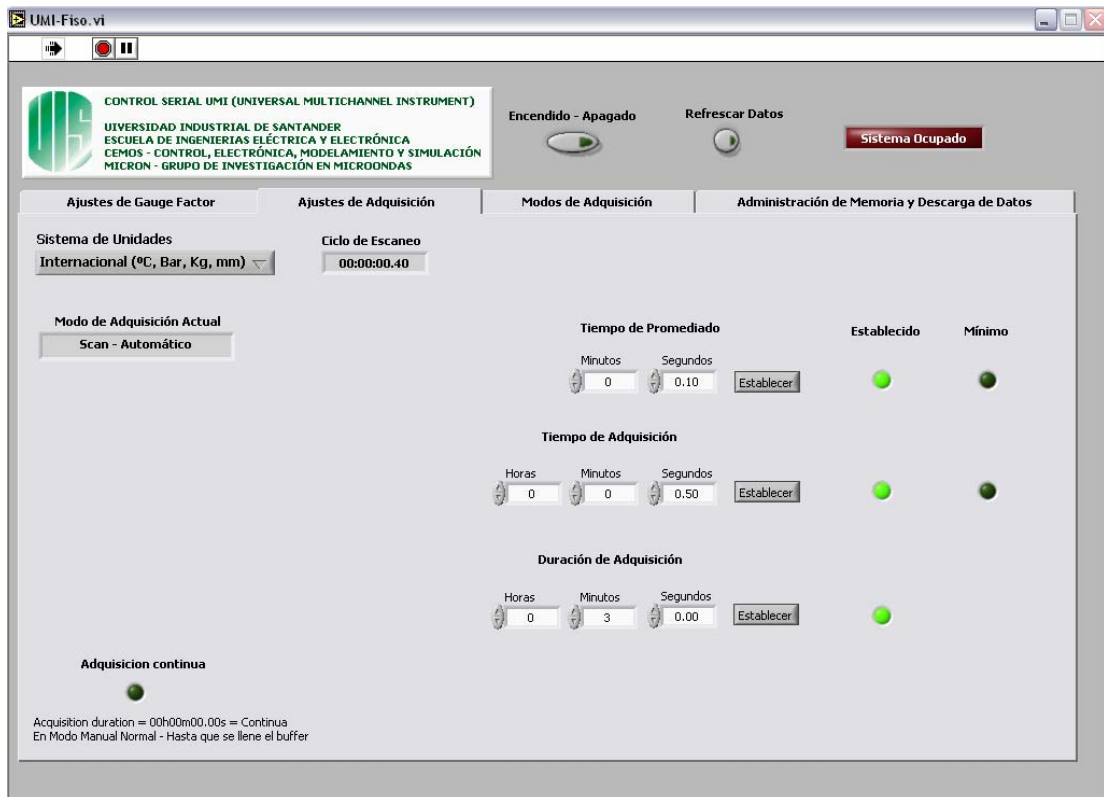
5.8.2. AJUSTES DE ADQUISICIÓN

Aquí podemos observar y configurar los parámetros de los modos de adquisición, como tiempo de promediado (*Acquisition Average*), Tiempo de Adquisición (*Acquisition Rate*) y Duración de Adquisición (*Acquisition Duration*); los cuales indicaran como se realizará la toma de datos y por cuanto tiempo, allí mismo se encuentra el indicador establecido que informa si el valor visualizado es el que se encuentra actualmente configurado, el indicador Mínimo informa si el valor que se

encuentra configurado es el mínimo permitido y el indicador Adquisición Continua informa si la adquisición se realizará de manera continua; esto quiere decir que solo se detendrá con la orden de detener o hasta que el Buffer del UMI se llene, esto dependiendo del modo de adquisición (figura 17). Desde esta pestaña podemos elegir el sistema de unidades en que queremos que los datos sean visualizados, en cualquiera de los dos sistemas utilizados por el UMI:

- Sistema uno (°C, Bar, Kg, mm)
- Britanico (°F, Psi, Lb, In).

Figura 17. Pestaña Ajustes de Adquisición



Fuente: Autores

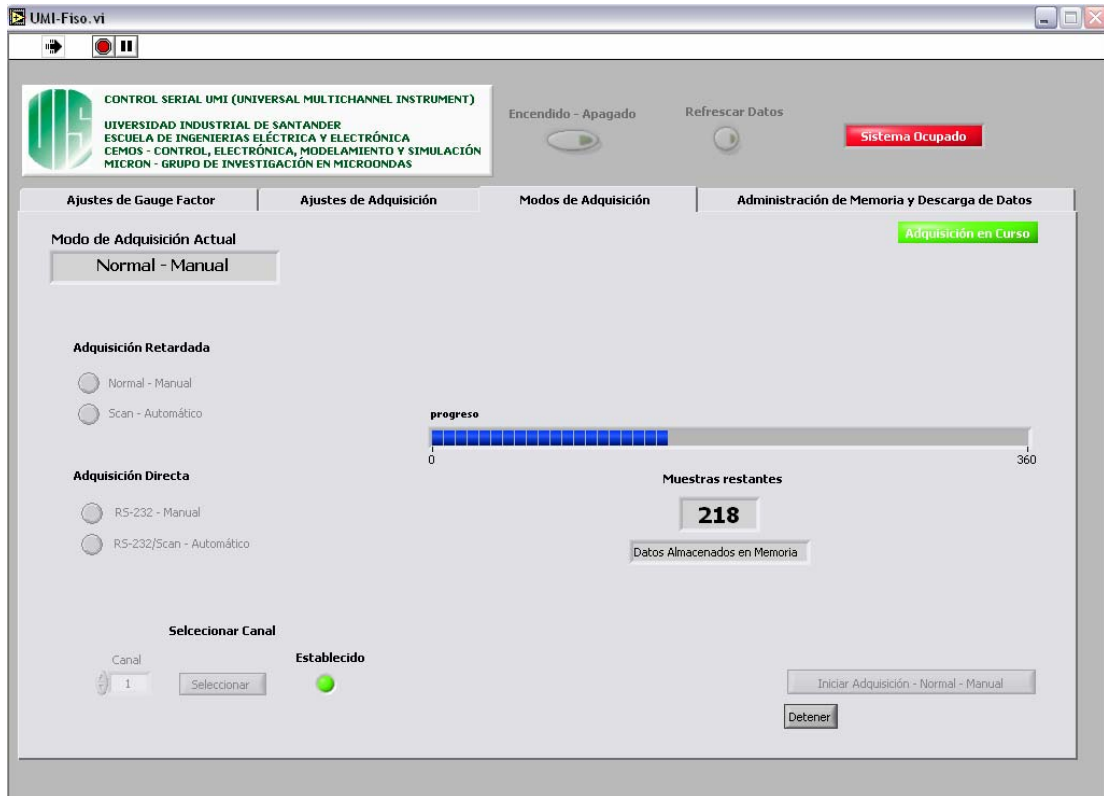
5.8.3. MODOS DE ADQUISICIÓN

Permite seleccionar el tipo de adquisición, entre los cuales tenemos Adquisición Retrasada (*Data Storage*), en donde los datos se almacenan en el Buffer del UMI para una posterior descarga por puerto RS-232 y Adquisición Directa (*Direct Acquisition*) en donde cada dato adquirido es inmediatamente enviado al PC por el puerto RS-232, a su vez estos dos se dividen en automático y manual, en el primero de estos, los canales activos se leen uno después de otro, por otra parte en el modo manual el usuario escoge en cual de los canales realizará la adquisición.

En los modos de Adquisición Retrasada (*Data Storage*), al iniciar una adquisición aparece un indicador que muestra cuantas muestras faltan para terminar la adquisición (figura 18), al finalizar podrá ser descargada al PC con el nombre que el usuario especifique desde la pestaña Administración de Memoria y Descarga de Datos.

Dependiendo del modo de adquisición seleccionado, se harán accesibles datos de configuración propios de cada modo y se desactivaran aquellos que no se utilicen.

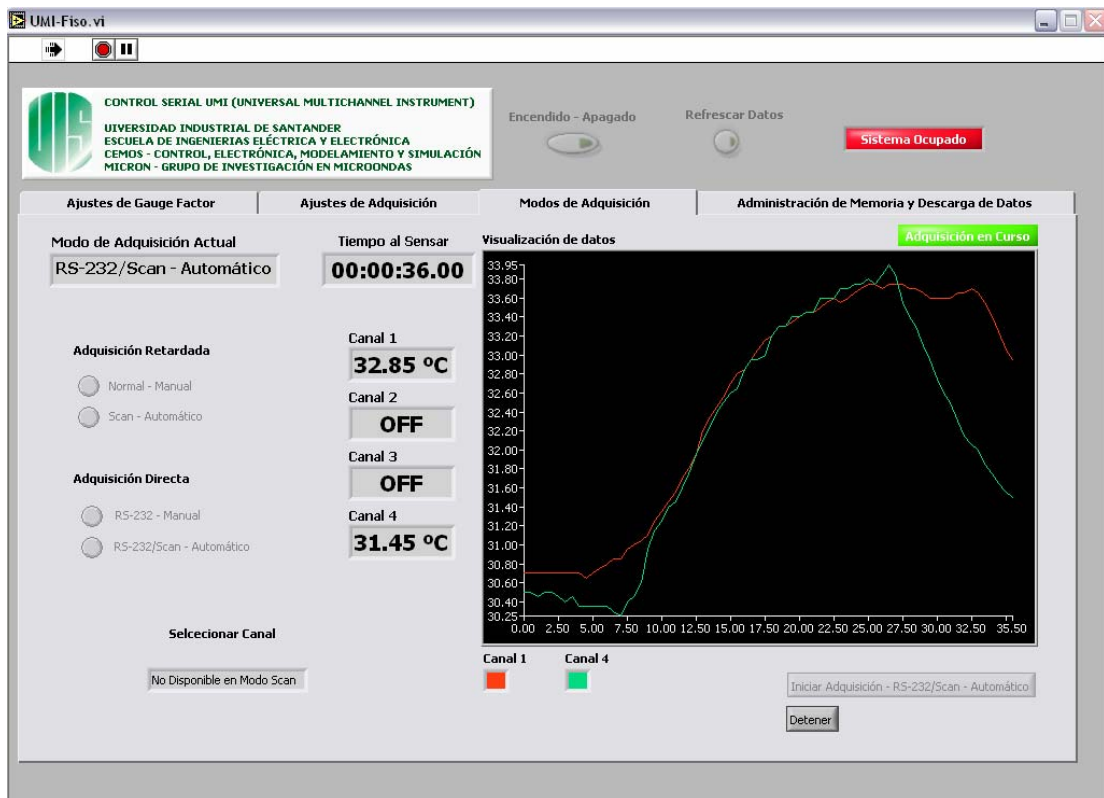
Figura 18. Pestaña Modos de Adquisición en modo Adquisición Retrasada Normal-Manual



Fuente: Autores

Al iniciar una adquisición en cualquiera de los modos Adquisición Directa (*Direct Acquisition*), a medida que un dato es recibido este es graficado, logrando así una visualización en tiempo real; terminada la adquisición de datos estos son guardados en una hoja de calculo especificada por usuario (figura 19).

Figura 19. Pestaña Modos de Adquisición en modo RS-232/Scan-Automático

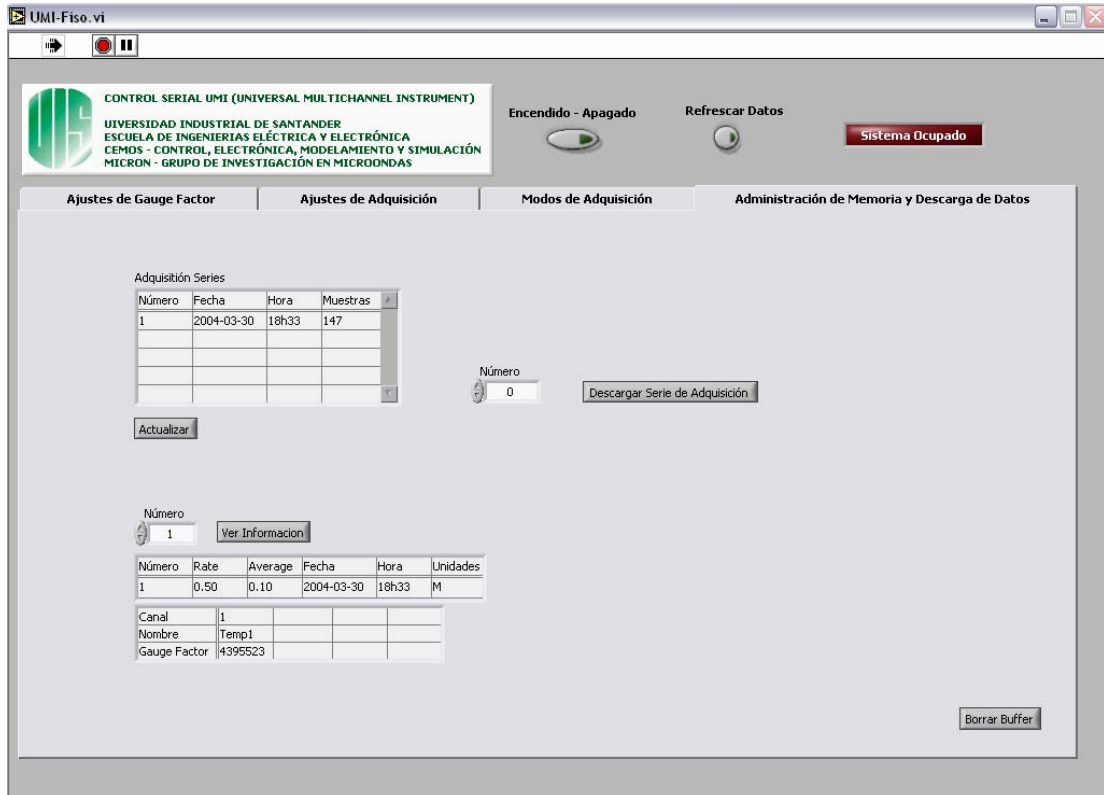


Fuente: Autores

5.8.4. ADMINISTRACION DE MEMORIA Y DESCARGA DE DATOS

Muestra las adquisiciones realizadas en el modo Adquisición Retrasada (*Data Storage*) junto con la fecha en la que fue realizada y el número de muestras que se almacenaron; también se puede acceder a información mas detallada de cada adquisición. El usuario puede descargar al PC la adquisición que seleccione o borrar el buffer del UMI (figura 20).

Figura 20. Pestaña Administración de Memoria y Descarga de Datos.



Fuente: Autores

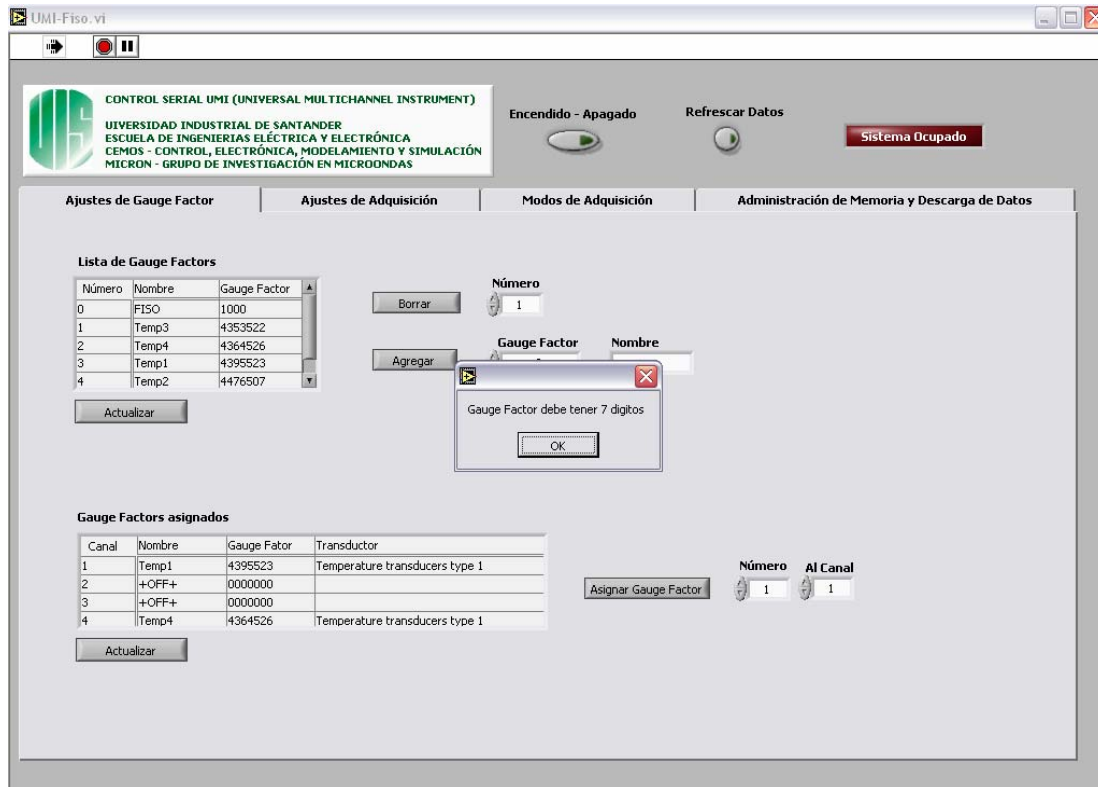
5.8.5. CARACTERÍSTICAS DE PREVENCIÓN DE ERRORES.

Al iniciar el programa, este extrae toda la información necesaria del UMI para actualizar los datos que son mostrados en el PC, así el usuario puede observar en que configuración se encuentra y que datos están en memoria, además cuenta con un botón de Refrescar Datos el cual hace exactamente lo mismo, esto con el fin de no tener que iniciar el programa cada vez que necesitemos ver como esta configurado.

Una característica importante del software es que cada dato mostrado al usuario a sido extraído de la memoria del UMI, y cada vez que se realice un cambio en configuración o memoria, el software automáticamente actualizará los campos que muestren información que se vea alterada por cambios realizados por el usuario, esto le mostrará al usuario si su configuración fue aceptada, o si fue rechazada y no se realizaron cambios.

El software cuenta con restricciones y mensajes emergentes para que el usuario no introduzca datos errados o utilice el software inadecuadamente, a esto se le suma la corrección de errores propia del dispositivo, la cual evita la configuración inválida del mismo (figura 21).

Figura 21. Advertencia al intentar introducir una configuración inválida.



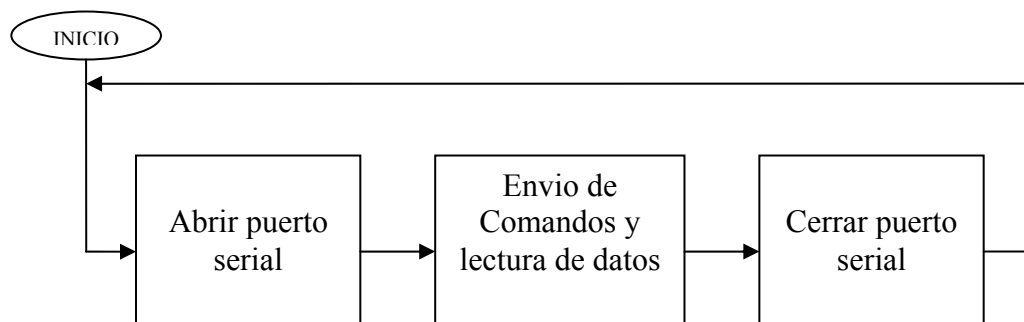
Fuente: Autores

5.9. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW

El algoritmo desarrollado en Labview consta de tres bloques básicos, Abrir puerto serial, Envío de comandos y lectura de datos, y Cerrar puerto serial (figura 22). En el bloque Abrir puerto serial, se configuran los parámetros necesarios para establecer comunicación por medio del puerto serie entre el PC y el UMI, seguidamente se envía

el comando¹⁰ de acuerdo a la acción que deseamos realizar. La acción puede ser de lectura de memoria del UMI o de escritura de datos del PC a memoria; si el comando enviado fue de lectura, el UMI envía al PC la información solicitada por el comando, la cual es almacenada en Buffer para una posterior extracción, manipulación y visualización. Por ultimo se cierra la sesión de comunicación serial.

Figura 22. Diagrama básico del algoritmo en Labview para configuración y adquisición de datos del UMI.



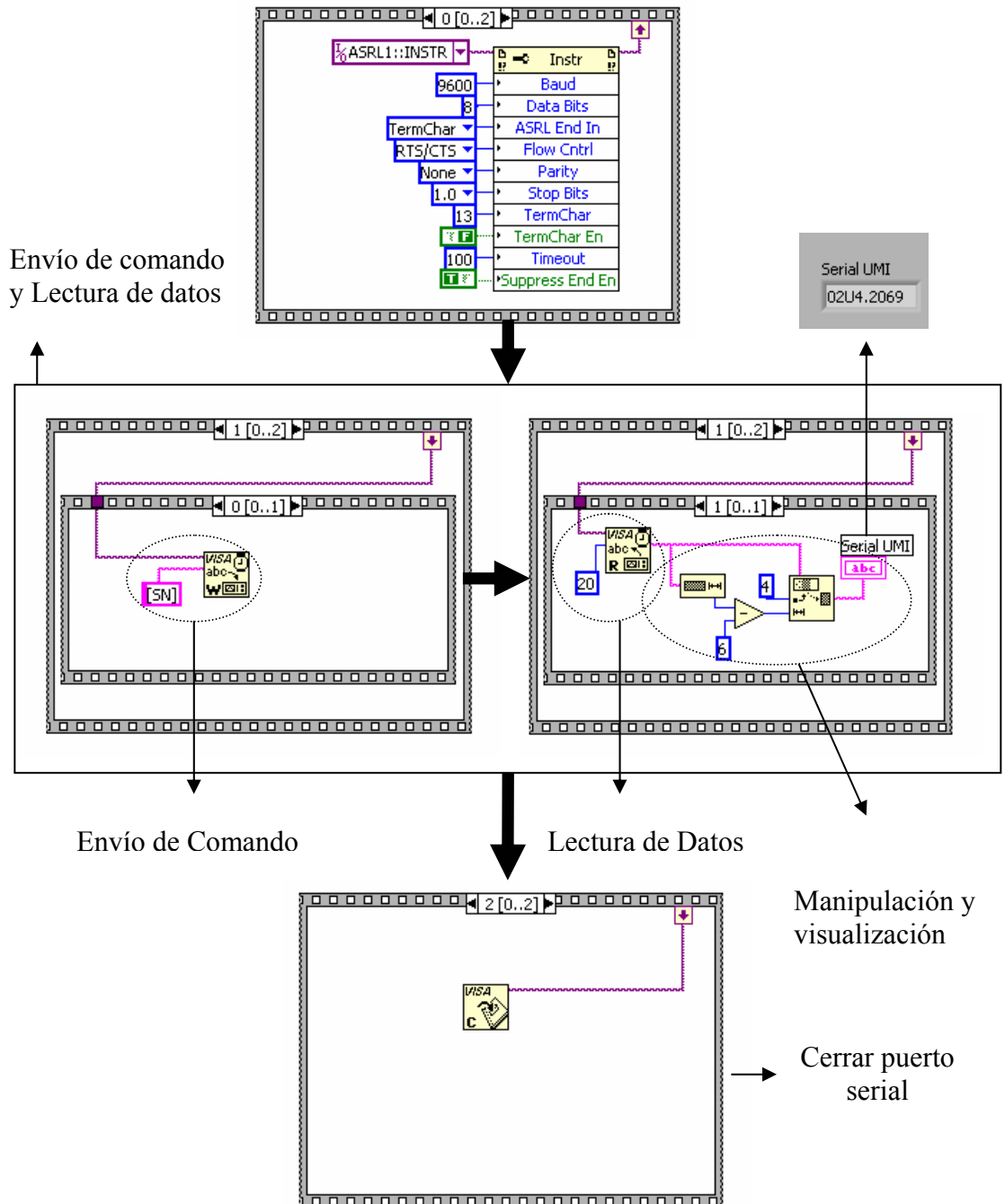
Fuente: Autores

En la Figura 23 se ilustra la programación para la obtención y visualización del número serial del UMI, siguiendo el diagrama de bloques mostrado en la figura 22.

Los comandos del UMI que se pueden configurar por medio del software fueron programados siguiendo la secuencia mostrada en las figuras 22 y 23.

¹⁰ Los comandos para la manipulación del UMI a través del puerto serie se encuentran en el Anexo D.

Figura 23. Programación en Labview para la obtención y visualización del número serial del UMI a través del puerto serie.



Fuente: Autores

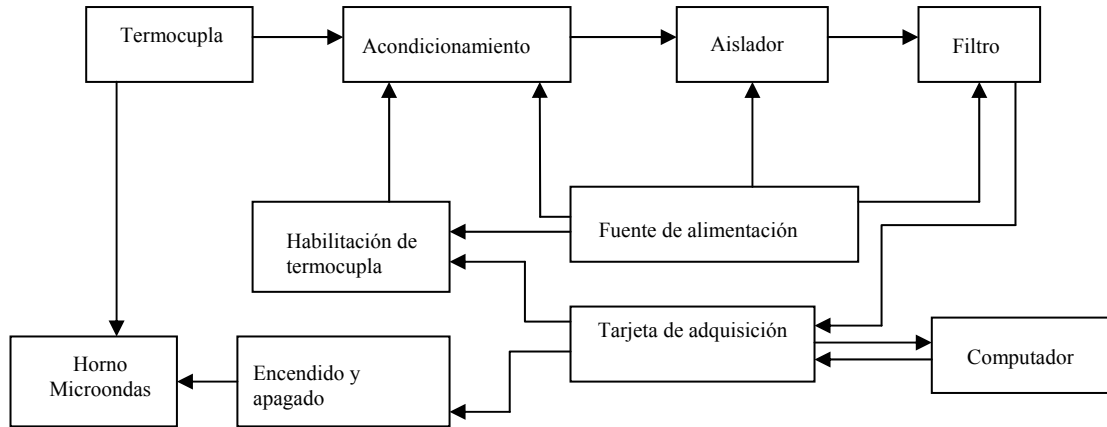
6. CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE SENSADO DE TEMPERATURA DENTRO DE UNA CAVIDAD CON PRESENCIA DE MICROONDAS.

6.1. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

La medición de temperatura en presencia de campos de microondas con sensores convencionales, se convierte en un problema debido a las corrientes que se pueden inducir en ellos, ya que en la mayoría de casos, están constituidos de materiales metálicos. Actualmente existen equipos que permiten realizar este tipo de mediciones bajo presencia de campos electromagnéticos con sensores a base de fibra óptica como se mostró en el capítulo 5, sin embargo la adquisición de estos equipos es costosa. En este capítulo se presenta una estrategia para medir temperatura por medio de termocupla en el interior de una cavidad y controlar simultáneamente el encendido y apagado del horno para la realización de dicha medida, así como los tiempos en que se realizarán los sentidos de temperatura.

El dispositivo es controlado por computador a través de una tarjeta de adquisición de datos PCI 1200 de NATIONAL INSTRUMENTS. Consta de etapas de acondicionamiento, filtrado, aislamiento, fuentes de alimentación e interfaz con el computador, entre otras. En la figura 24 se muestra un diagrama de bloques de las principales etapas que involucran la adquisición de temperaturas.

Figura 24. Diagrama de bloques de la adquisición y procesamiento de datos de temperatura dentro de un horno microondas.



Fuente: autores

6.1.1. SENSOR DE TEMPERATURA TERMOCUPLAS TIPO K

La termocupla utilizada en la implementación del sistema de sensado de temperatura es de tipo K; esta termocupla tiene la ventaja de ser simple de manejar, de bajo costo y puede operar en un amplio rango de temperaturas¹¹. Cabe recordar que una termocupla es un transductor que convierte una variable física, como lo es la temperatura, en una variable eléctrica como es el voltaje. Las termocuplas constan de un par de hilos conductores¹² de diferente material unidos en un extremo; cuando esta unión es expuesta a una temperatura en su otro par de extremos entregan un voltaje diferencial comportándose de acuerdo a una característica descrita por el efecto **Seebeck**.

¹¹ 190 °C a 1260 °C.

¹² Para el caso de las termocuplas K constituidas de Cromel y Alumel.

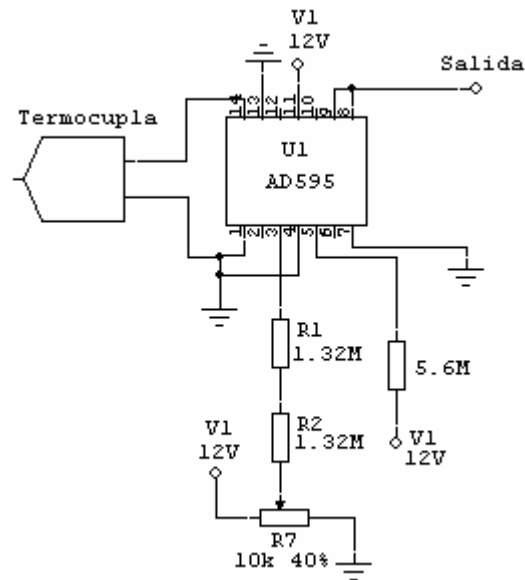
Las termocuplas son colocadas dentro de la cavidad del horno y solo deben ser habilitadas cuando el magnetrón se encuentra apagado. Esta consideración se debe tener en cuenta para evitar errores en el sensado de temperatura por las corrientes inducidas por el campo electromagnético.

6.1.2. ACONDICIONADOR DE SEÑAL

El acondicionador utilizado es el circuito integrado AD595 de Analog Devices que es un linealizador para termocuplas tipo K, incluye dentro de su empaquetado un amplificador de instrumentación junto con un compensador de unión fría para la termocupla. Este combina una referencia de punto frío con un amplificador precalibrado para producir a la salida con una variación de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ a partir de la medida de tensión de la termocupla. La alimentación de este acondicionador es con una fuente de 12 voltios, suficiente para cubrir el rango de temperaturas de 10°C a 250°C requerido por la aplicación del presente trabajo de grado. La compensación de la unión fría en el AD595 se hace por medio de un trimmer para ajustar los niveles de transferencia entre el voltaje de la termocupla y la salida generada por el acondicionador. Este acondicionador fue empleado en la tesis “Mejoramiento de la Eficiencia Energética en un Proceso de Destilación de Agua que Utiliza Microondas como Medio de Calentamiento”.

En la figura 25 se muestra el circuito empleado para el acondicionamiento del transductor de temperatura.

Figura 25. Diagrama del circuito de acondicionamiento de la señal de termocupla.



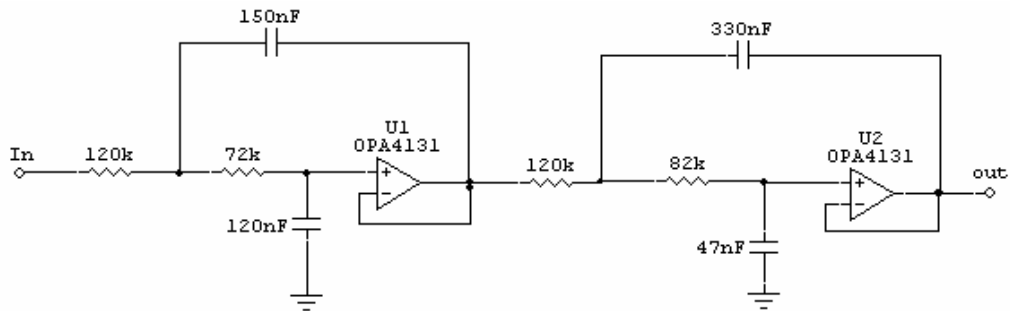
Fuente: Autores

6.1.3. ETAPA DE AISLAMIENTO

Esta etapa del hardware es implementada con el fin de proteger tanto la tarjeta de adquisición de datos como el computador de posibles corrientes y sobre tensiones, que se puedan generar dentro de la cavidad de microondas y ser transmitidas por la termocupla durante el sensado de temperatura o incluso durante los ciclos en que el magnetrón del horno este encendido. Para esto se ha utilizado el circuito integrado ISO 122 de Burr Brown que es un amplificador de aislamiento el que utiliza una

El filtro activo fue implementado con amplificadores operaciones tipo FET que se encuentran dentro del circuito integrado OPA 4131PJ, estos amplificadores son de propósito general y ofrecen excelentes características como bajo voltaje de offset que es importante en el diseño del filtros para no alterar la medida de voltaje que consecuentemente afectaría la medida de temperatura.

Figura 27. Diagrama del filtro activo pasabajas de cuarto orden.



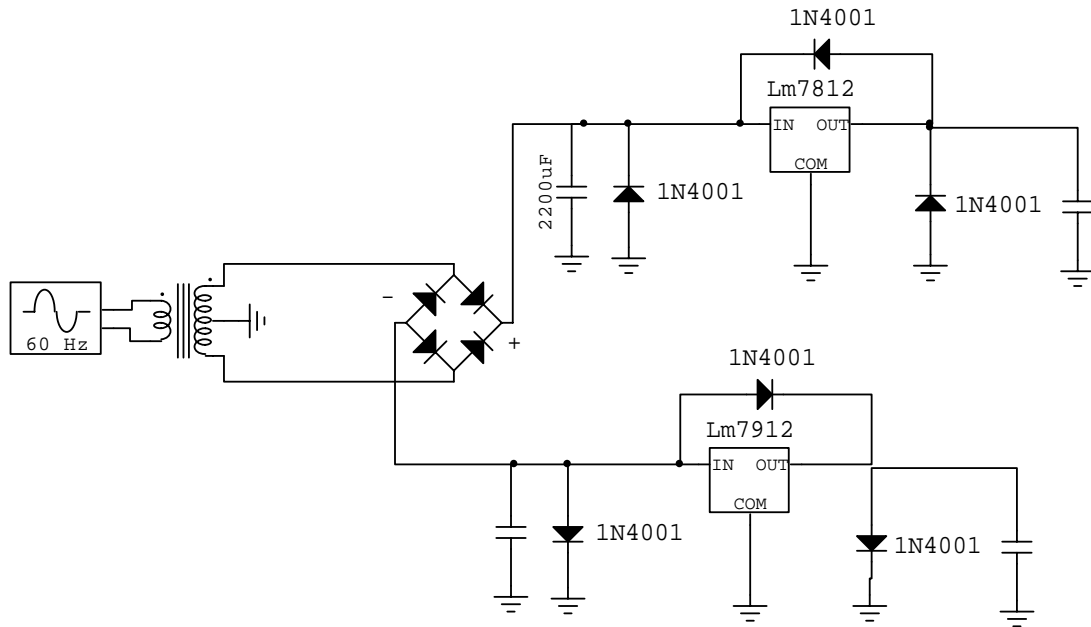
Fuente: autores

6.1.5. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para suministrar tensiones a los diferentes elementos de la tarjeta de acondicionamiento se han diseñado dos fuentes de tensión duales de $\pm 12V$, una encargada de la alimentación de la primera etapa del circuito (antes del aislamiento) que incluye el acondicionador, y la primera parte del aislador ISO122 y, la segunda fuente alimenta la otra parte del aislador, el filtro activo de cuarto orden y los controles de encendido del horno y habilitación de la termocupla (Figura 28).

La fuente se diseñó con un transformador que posee un primario de 110 V y dos secundarios de 20 V con tap central, para crear dos fuentes duales, de 12 V y -12 V.

Figura 28. Circuito de alimentación implementado en el hardware.



Fuente: autores

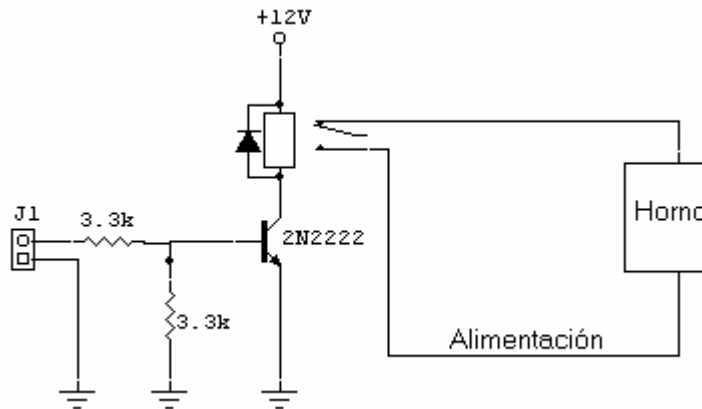
6.1.6. CONTROL DE ENCENDIDO Y APAGADO DEL MAGNETRÓN

Para la sensado de temperatura se necesitan tiempos en que el magnetrón este encendido y otros tiempos en que se encuentren apagados, este control se realiza por medio de un algoritmo desarrollado en labview y una tarjeta de adquisición de datos PCI -1200 que genera una señal para energizar o desenergizar un relé que permite el

encendido o el apagado del magnetrón; dicho relé en la parte del contacto puede manejar tensiones hasta 250Va.c y corrientes hasta 16 A

En la figura 29 se muestra el hardware que controla el encendido y apagado del Magnetrón.

Figura 29. Circuito de control de encendido y apagado del horno microondas.



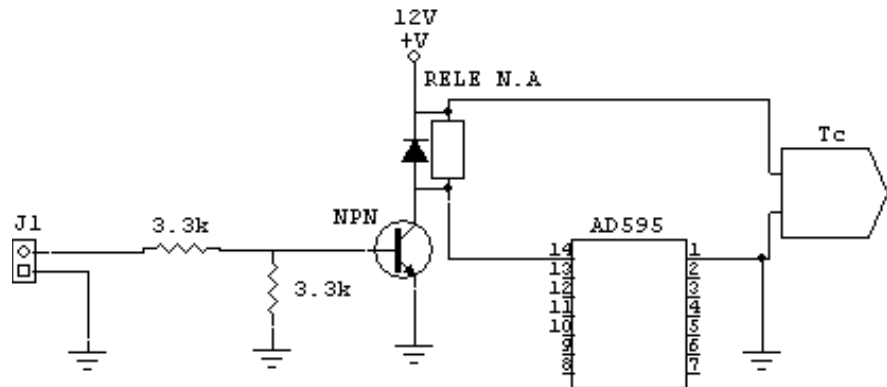
Fuente: Autores

6.1.7. CONTROL DE HABILITACIÓN DE LA TERMOCUPLA

Para realizar la lectura de temperatura, se habilita un relé EDR201A1200 que permite conectar uno de los extremos de la termocupla con el acondicionador de señal, haciendo que la señal llegue hasta la tarjeta de adquisición. El hardware que permite este control se muestra en la figura 30 y tiene un funcionamiento similar al presentado para el control del encendido y pagado del magnetrón. Los dos reles de

control¹³ son manejados por el algoritmo de manera mutuamente excluyente, es decir, que cuando alguno de ellos este activado el otro relé se encontrará desactivado y viceversa.

Figura 30. Circuito de control de habilitación de la termocupla.



.Fuente: Autores

6.1.8. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La tarjeta de adquisición de datos empleada es la PCI-1200 de NATIONAL INSTRUMENTS (figura 31), esta posee ocho canales de entradas analógicas, 24 líneas digitales TTL y tres contadores o temporizadores de 16 bits. Con la tarjeta de adquisición PCI 1200 se generan las señales de control digitales del encendido y apagado del magnetrón y de la habilitación de la termocupla, junto a estas señales se adquiere la señal analógica de tensión que representa el valor de la temperatura y que

¹³ Encendido del magnetrón y habilitación de la termocupla

será llevada hasta la interfaz implementada en LabVIEW™. El proceso para adquirir la señal analógica es realizada por medio de un amplificador de instrumentación y un conversor analógico digital que se encuentran en la tarjeta de adquisición, posteriormente se digitaliza la señal para ser visualizada en LabVIEW™

Figura 31. Tarjeta de adquisición de datos PCI-1200.



Fuente: www.ni.com

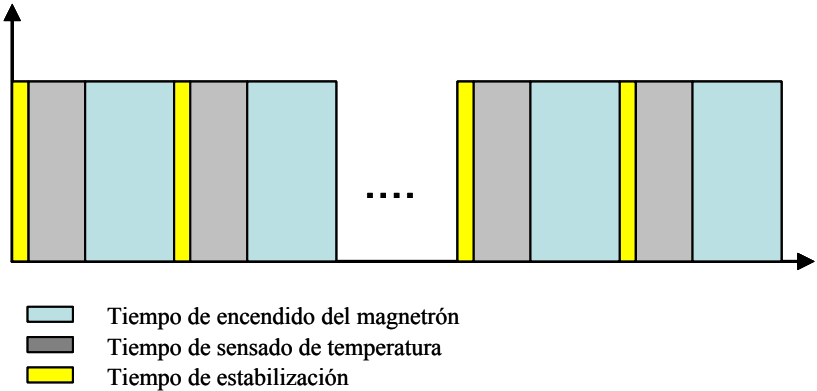
6.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Para realizar el control de encendido-apagado del horno y la medida de temperatura, se desarrollo un algoritmo en LabVIEW que junto con la tarjeta de adquisición de datos PCI-1200 de NATIONAL INSTRUMENT permiten interactuar con el resto del hardware empleado. Para ello se utiliza una entrada analógica correspondiente a la entrada CH2 (pin 3 de la tarjeta de adquisición), junto con dos salida digitales correspondientes al puerto A (PA2 y PA3, pines 16 y 17 respectivamente).

El programa realizado en LabVIEW permite observar la temperatura del proceso en los intervalos de tiempo asignados por el usuario a través de la interfaz. Debido a que el sensor de temperatura es una termocupla y el medio en que realizamos la medida hay presencia de microondas, no es posible hacer esta medida en todo tiempo, por ello se crean unos tiempos de conmutación en donde se deja de alimentar el circuito que compone al magnetron y se activa el circuito de sensado de temperatura.

En la figura 32 se presenta el diagrama de tiempos del funcionamiento del equipo, en el se encuentran los tiempos de encendido, los tiempos de sensado y un tiempo de estabilización que es constante en el programa de duración 3 segundos con el cual se hace una espera para que el campo remanente presente en la cavidad disminuya lo máximo posible para efectuar la medida sin alteraciones; esta estrategia también fue utilizada en dos trabajos de grado anteriores “Mejoramiento de la Eficiencia Energética en un Proceso de Destilación de Agua que Utiliza Microondas como Medio de Calentamiento” y “Diseño y Construcción de un Equipo para Tratamiento de Muestras de Pavimento”.

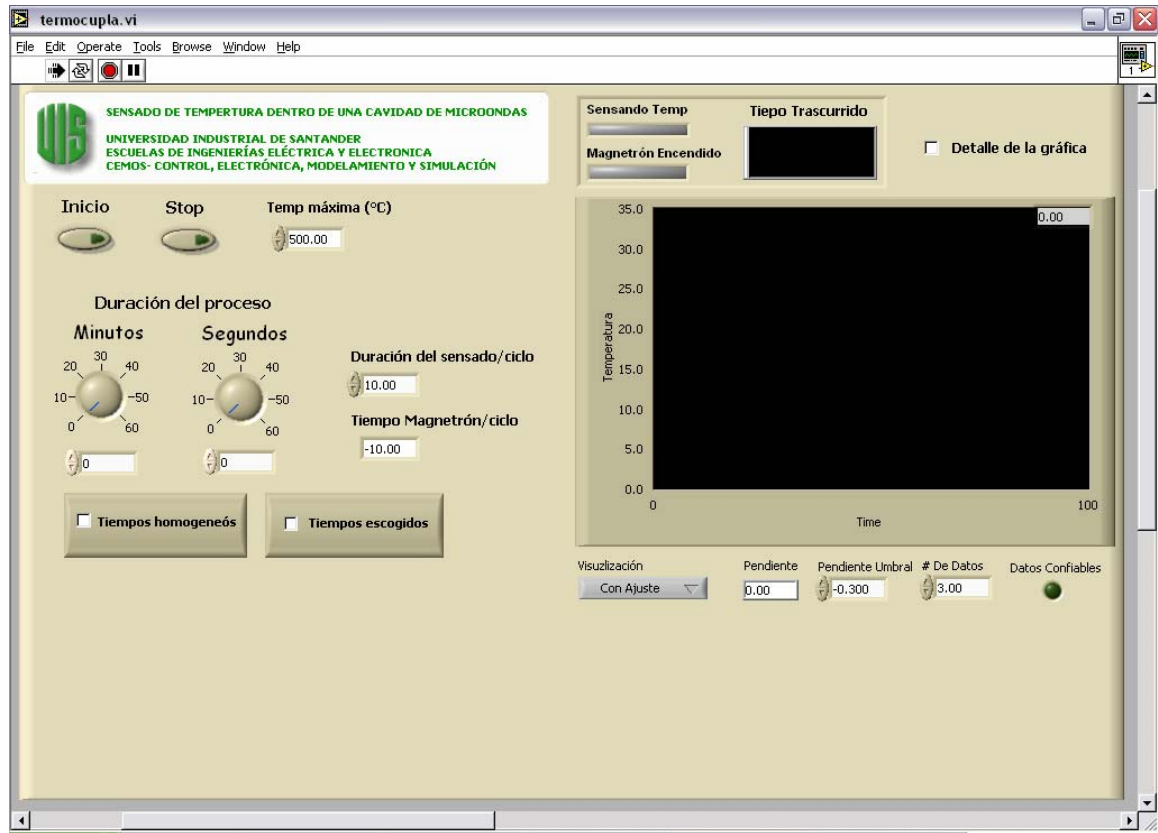
Figura 32. Diagrama de tiempos de funcionamiento.



Fuente: autores

El algoritmo desarrollado consta de un menú en el que se ajustan los tiempos de duración total del proceso, los tiempos en que se requieran hacer los sensados, la duración del sensado y la temperatura máxima con la cual el programa dejaría de operar. En la figura 33 se puede observar el panel frontal del programa.

Figura 33. Panel frontal del programa de sensado de temperatura.



Fuente: autores

6.2.1. SELECCIÓN DE TIEMPOS DEL PROCESO

6.2.1.1. Duración total del proceso

La duración del tiempo total de proceso es especificada por el usuario por medio de los controles (segundos - minutos) que aparecen en el panel frontal de LabVIEW (figura 34). Estos valores deben ser mayores que el tiempo que se haya fijado para la

duración del sensado, o de otra manera el programa no arrancará y visualizará un aviso que este tiempo no es el adecuado para el proceso.

Figura 34. Controles Del Tiempo Total Del Proceso.



Fuente: autores.

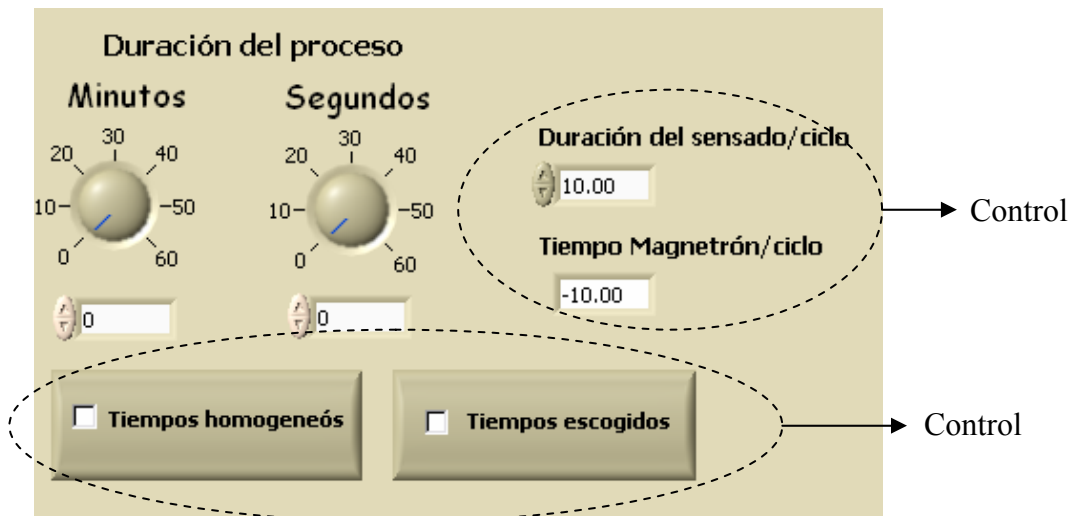
6.2.1.2. Duración Del Sensado

En este control se ajusta el tiempo en segundos que durara el proceso de sensado, este tiempo debe ser menor que el tiempo total del proceso. El control maneja el tiempo dedicado a realizar la medición de temperatura, con él se marca la duración del sensado y la muestras que se recogerán por cada ciclo de sensado. En la figura 35 se encuentra el control de duración de sensado presente en el panel frontal del programa, y que sirve para que el usuario ajuste este nivel.

6.2.2. SELECCIÓN DE TIEMPOS DE SENSADO

Estos tiempos permiten configurar los inicios de los procesos de sensado durante el tiempo que dure la prueba. El programa emplea dos formas de establecer estos inicios de periodo, que aparecen con el nombre de **tiempos escogidos** y **tiempos homogéneos**, estos son controles booleanos que permiten escoger entre alguno de los dos, excluyendo al otro en el momento en que alguno sea seleccionado. Cuando alguno de los controles es activado se despliega un menú con el que se elige el número de veces que se desea realizar sensado durante el proceso. En la figura 35 se muestran las opciones de selección de tiempos presentes en el panel frontal del programa.

Figura 35. Controles de selección de tiempos de sensado, duración de sensado y temperatura máxima.



Fuente: autores

6.2.2.1. Tiempos Homogéneos

Cuando este control es activado, los tiempos de sensado se ajustan de manera uniforme en todo el rango de tiempo que dura la prueba, estos valores se ajustan teniendo en cuenta el número de veces que se haya decidido realizar el sensado y a la duración del proceso. Con esta opción se puede tener un barrido de la temperatura durante todo el proceso en intervalos de tiempo iguales, además permite ajustar de manera rápida estos tiempos de inicio del sensado. En la figura 36 se muestra el panel de control con la opción de tiempos homogéneos activada.

Figura 36. Menú de selección de tiempos de sensado homogéneos durante el proceso.

tiempo_1	tiempo_2	tiempo_3	tiempo_4	tiempo_5
27.00	54.00	81.00	108.00	135.00
tiempo_6	tiempo_7	tiempo_8	tiempo_9	tiempo_10
162.00	189.00	216.00	243.00	270.00

Fuente: Autores.

6.2.2.2. Tiempos Escogidos

En esta opción, los tiempos de inicio de sensado son determinados por el usuario y pueden ser puestos aleatoriamente dentro del tiempo total de duración del proceso. Al ser activados los tiempos escogidos aparecen dos casillas por cada tiempo que se desea establecer, en el cual se introducen los tiempos en minutos y en segundos. En la figura 37 se muestra el panel de control con la opción tiempos escogidos activada.

Figura 37. Menú de selección de tiempos de sensado escogidos por el usuario durante el proceso

The screenshot shows a control panel with the following elements:

- Two radio buttons: **Tiempos homogéneos** and **Tiempos escogidos**.
- A section titled **Tiempos** containing ten pairs of spinners for minutes and seconds:
 - t1_min: 10
 - t1_seg: 30
 - t2_min: 1, t2_seg: 0
 - t3_min: 1, t3_seg: 10
 - t4_min: 1, t4_seg: 20
 - t5_min: 1, t5_seg: 40
 - t6_min: 2, t6_seg: 0
 - t7_min: 2, t7_seg: 18
 - t8_min: 2, t8_seg: 41
 - t9_min: 4, t9_seg: 5
 - t10_min: 4, t10_seg: 45
- A **Visulización** dropdown menu set to **Con Ajuste**.
- A **Pendiente** field with the value **0.00**.

Fuente: Autores.

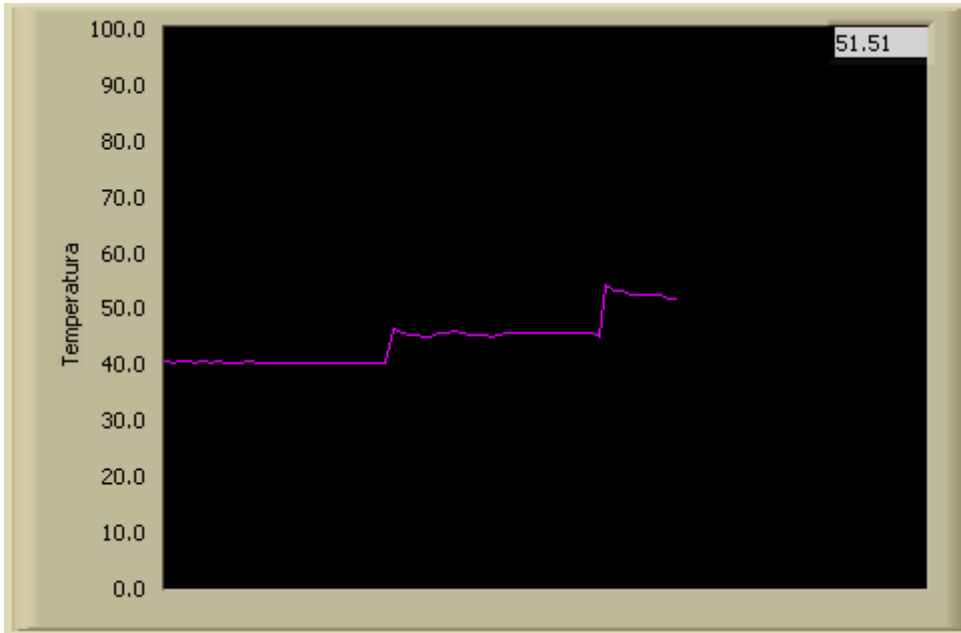
6.2.3. TEMPERATURA MÁXIMA

En el programa se muestra un control para asignar la temperatura máxima permitida durante el proceso de calentamiento, con lo cual se detendrá el proceso en cualquier instante de tiempo, una vez se alcance o se sobrepase esta temperatura, durante la ejecución del programa. Esta opción puede servir para asignar temperaturas de control o alguna temperatura crítica durante el proceso que implique detener el proceso.

6.2.4. VISUALIZACIÓN DE LA TEMPERATURA

En el panel frontal se muestra un gráfico con la temperatura del proceso en los momentos del sensado. En los procesos en que el horno esta funcionando se registra en el gráfico la ultima temperatura registrada en el tiempo de sensado; cuando se produzca un nuevo tiempo de sensado este cambiará su valor por el que se registre en la tarjeta de adquisición y así sucesivamente durante la totalidad del proceso. En la figura 38 se muestra el display implementado en el panel frontal.

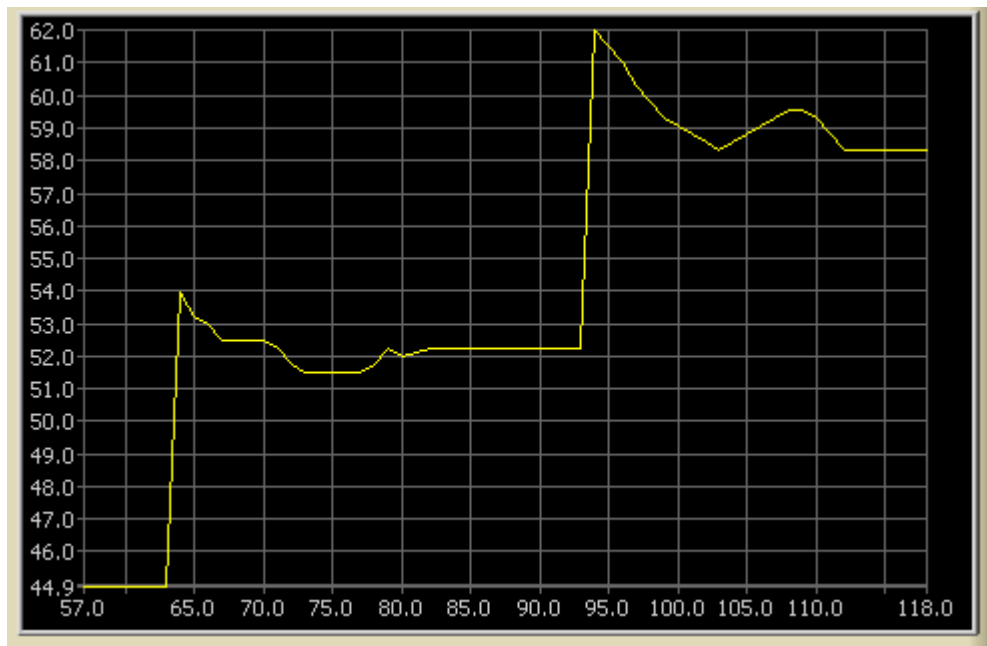
Figura 38. *Display* que muestra la temperatura y progreso del proceso.



Fuente: Autores

En el panel frontal se incluye un icono llamado acercamiento de la gráfica, que al ser accionado despliega un nuevo graficador, en cual muestra de forma detallada los 60 segundos más recientes del proceso (figura 39). Este puede ser de gran utilidad cuando se requiera ver de forma detallada la temperatura en los tiempos de sensado.

Figura 39. Icono de detalle de la gráfica.



Fuente: Autores

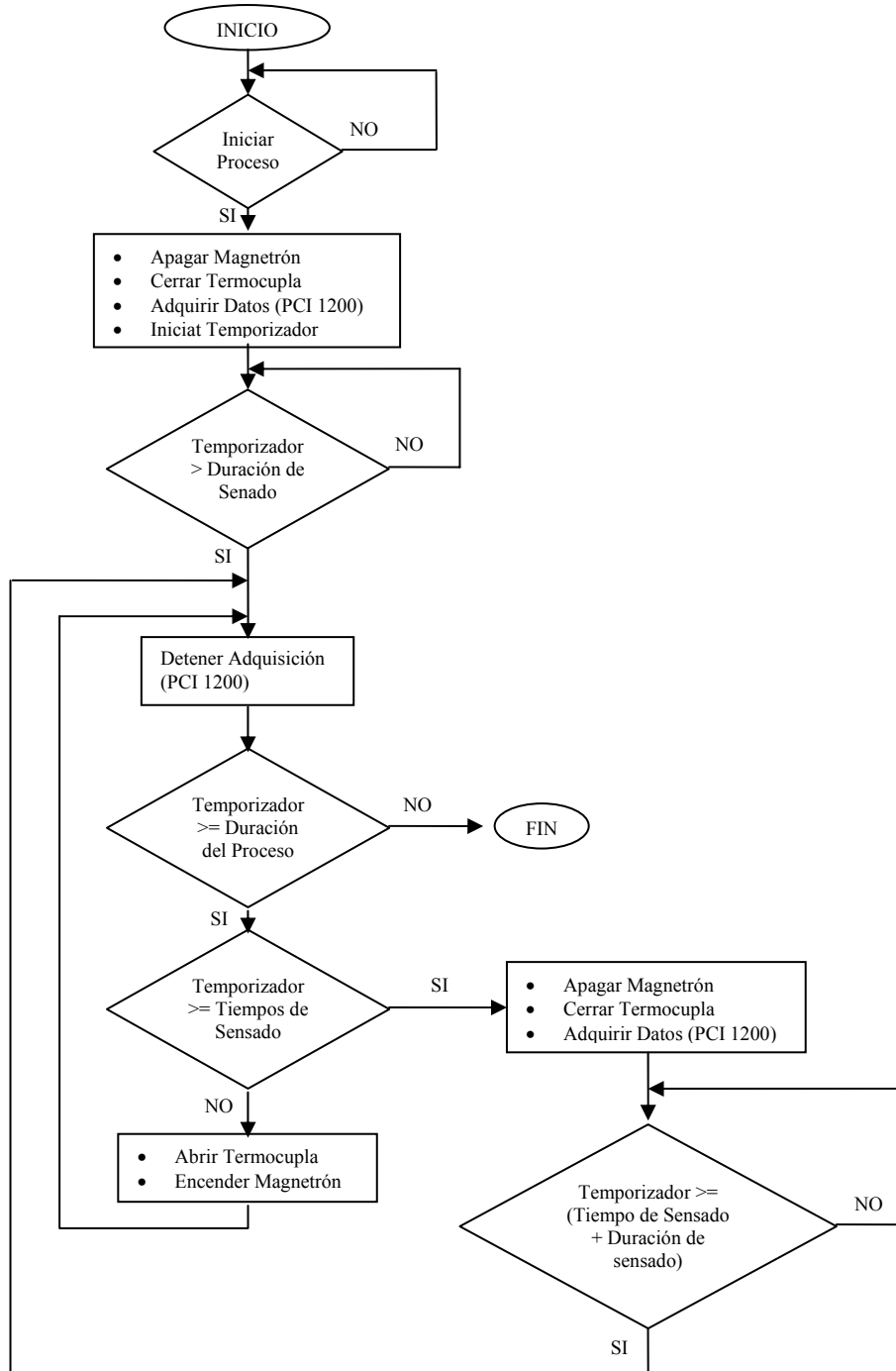
6.3. FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO

El funcionamiento del programa es amigable, después de ajustar los respectivos tiempos de duración del proceso, duración del sensado y los tiempos en que se realizaran los sensados de temperatura, se da inicio al programa, en primer lugar a un ciclo de toma de medidas de temperatura, que es activado al enviar 5 voltios por la salida 1 del puerto digital A de la tarjeta de adquisición; al completarse el respectivo tiempo de sensado se conmutará a la etapa de encendido del horno, esto se produce con el envío de 5 V por el *pin* 2 del puerto digital A y al mismo tiempo enviando 0 V al pin 1 del puerto A para deshabilitar la termocupla. Este proceso de conmutación

se repetirá tantas veces como ciclos de sensado se hayan programado. Al final del proceso se realizara un nuevo ciclo de sensado, culminado este proceso se despliega un menú con el que se confirma o se rechaza que los datos tomados, sean almacenados en una hoja de cálculo para su posterior manipulación o simplemente mantenerlos como un archivo de registro.

Para ilustrar el funcionamiento del algoritmo se presenta un diagrama de flujo de las principales funciones (figura 40).

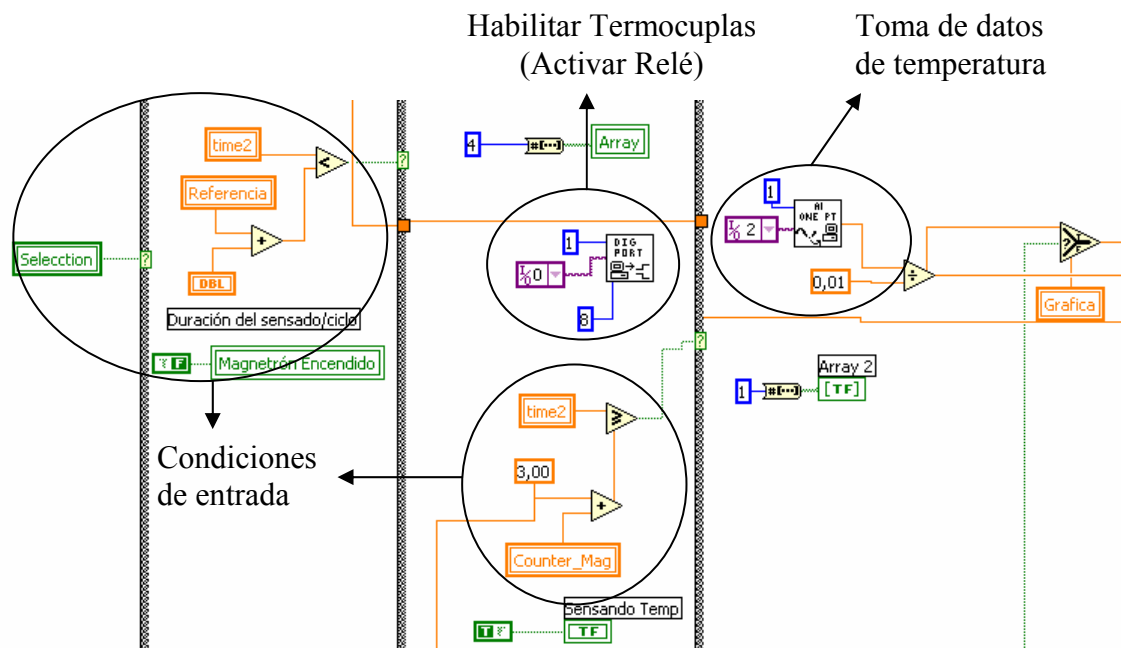
Figura 40. Diagrama de flujo para el desarrollado en LabView del sistema de sensado de temperatura con termocupla, cuando se produce calentamiento con microondas.



Fuente: Autores

La función de habilitación de sensado permite conectar la termocupla con el sistema de acondicionamiento a través del relé y además activa a la tarjeta de adquisición PCI 1200 para tomar datos de temperatura. En la figura 42 se muestra la programación para realizar tanto la conexión de la termocupla, así como para el inicio de toma de datos

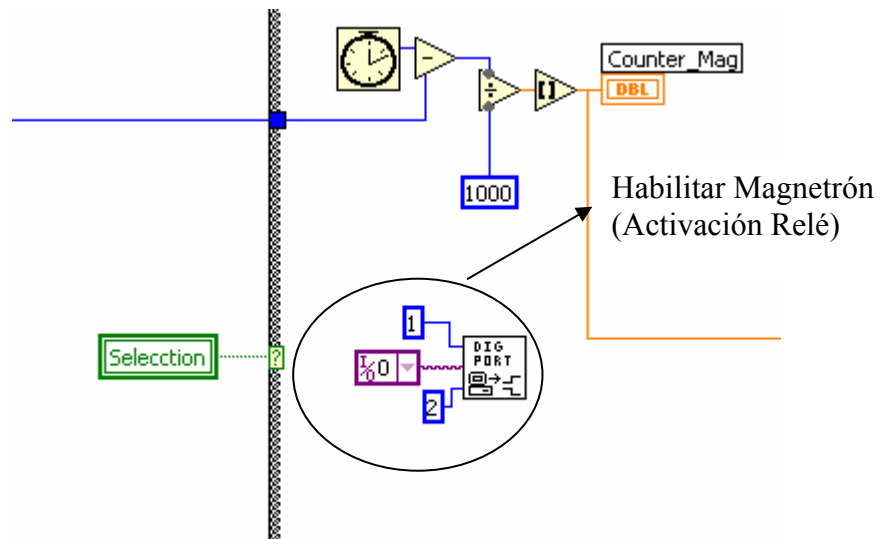
Figura 42. Programación en LabView para la realización de sensado de temperatura.



Fuente: Autores.

También se presenta la programación que permite realizar la función de habilitación de encendido del magnetrón, que permite la activación del relé de alimentación de éste, con el cual se inicia la emisión de microondas (figura 43).

Figura 43 Programación en LabVIEW para la realización del encendido del magnetrón.



Fuente: Autores.

7. DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE SENSADO DE TEMPERATURA POR MEDIO DE TERMOCUPLA EN UNA CAVIDAD ELECTROMAGNÉTICA.

En este capítulo se presenta la calibración del sistema de sensado de temperatura implementado en este trabajo de grado, además se muestran resultados obtenidos de pruebas realizadas para determinar el desempeño del sistema frente a un equipo patrón.

Para realizar la calibración se desarrolló un algoritmo que se describe a continuación.

7.1. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PARA CALIBRACIÓN

En esta sección se presenta la unión de los dos algoritmos descritos en los capítulos 5 y 6, con las variaciones requeridas para realizar la calibración del sistema de termocupla; en este algoritmo se adquieren simultáneamente las señales del sistema de sensado por medio de termocupla junto con la señal del equipo patrón UMI.

7.1.1 Etiqueta de Termocupla

En esta etiqueta (Figura 44) se configuran los parámetros para la adquisición del sensado por medio de termocupla como los son la duración del sensado, el tiempo durante el cual el magnetron estará encendido, el tiempo de duración de los sensados ya sea en el modo de tiempos homogéneos o tiempos escogidos; también se despliegan mensajes de advertencia si el usuario introduce de manera errónea algunos parámetros de la configuración de esta etiqueta (Capítulo 6).

Figura 44. Etiqueta de Termocupla

Encendido - Apagado Refrescar Datos CONTROL SERIAL UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT) STOP

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CEMOS - CONTROL, ELECTRÓNICA, MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN
MICRON - GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MICROONDAS

Ajustes de Gauge Factor | Ajustes de Adquisición | Modos de Adquisición | Administración de Memoria y Descarga de Dato | termocupla | Sistema Ocupado

Duración de Sensado Duracion magnetron Encendido Activar Termocupla

Horas: 0 Minutos: 0 Segundos: 20 00:00:14.00

Tiempos homogéneos (checked) / Tiempos escogidos

Tiempo 1: 00:00:34.00 Tiempo 6: 00:03:24.00

Tiempo 2: 00:01:08.00 Tiempo 7: 00:03:58.00

Tiempo 3: 00:01:42.00

Tiempo 4: 00:02:16.00

Tiempo 5: 00:02:50.00

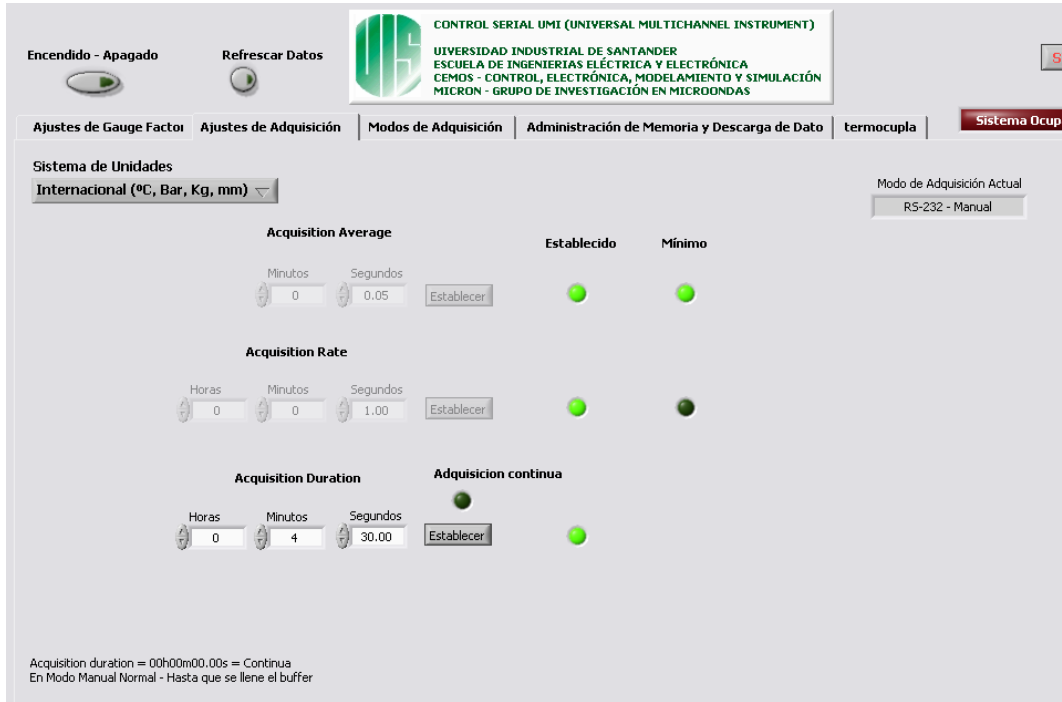
Tiempo: 7

Fuente: Autores

Además de esto se encuentra el pulsador de habilitación de termocupla por medio del cual se activa la adquisición de datos de la termocupla; también configura al UMI en el modo de RS-232 manual y deshabilita cualquier otro modo de operación propio del acondicionador. La habilitación de este pulsador tiene implicaciones en las etiquetas de *ajuste de adquisición* y *modo de adquisición*.

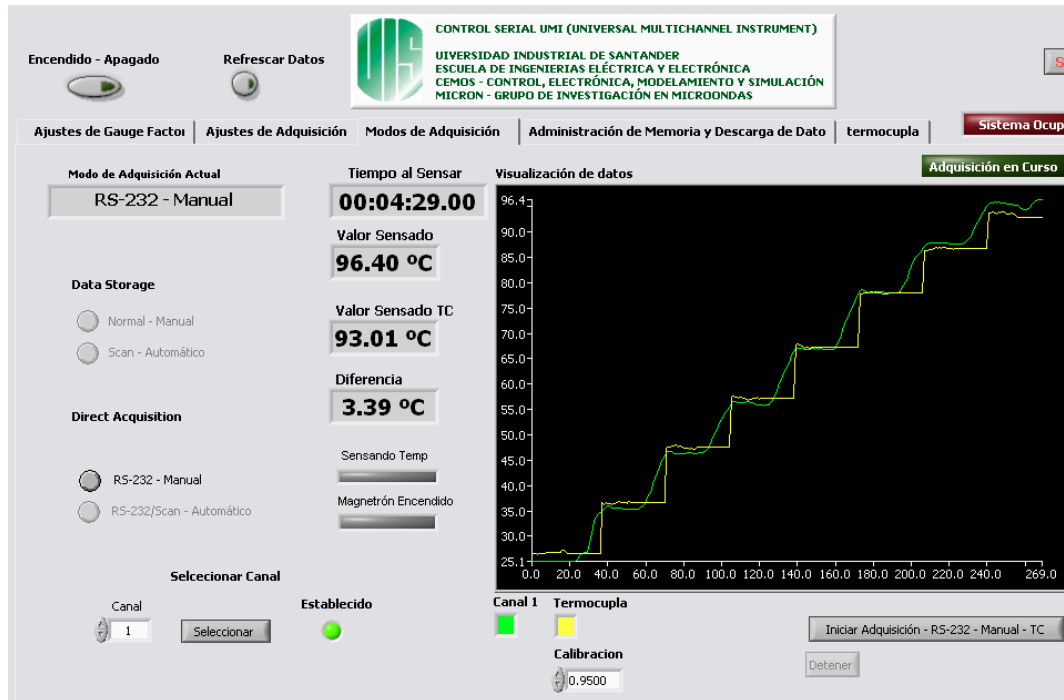
En la etiqueta de ajuste de adquisición se predeterminan los tiempos de promediado (Acquisition Average) y de Adquisición (Acquisition Rate) a 0.05 s y 1s respectivamente. La variable Duración de Adquisición (Acquisition Duration) establece el tiempo total del proceso de calibración (Figura 45). En cuanto a la etiqueta de *modo adquisición* se despliegan visualizadores de valor sensado por la fibra, valor sensado por la termocupla, tiempo de duración del proceso, la diferencia entre las medidas de temperatura de los dos sistemas, los estados (activado/desactivado) del magnetrón y del sistema de termocupla y la visualización de las dos graficas simultáneas adquiridas por los dos sistemas; también se presenta un control con el cual se modifica el factor de calibración que disminuirá la diferencia existente entre las medidas (Figura 46).

Figura 45. Etiqueta ajustes de adquisición cuando es habilitado pulsador de termocupla.



Fuente: Autores

Figura 46. Etiqueta modo de adquisición cuando es habilitado pulsador de termocupla.



Fuente: Autores

7.2. PRUEBAS DE CALIBRACIÓN

Para realizar la calibración y determinar el error en la medida de temperatura por medio del sistema implementado con termocuplas con respecto al equipo patrón UMI se realizaron dos tipos de pruebas:

- Sensado de Temperatura Variable
- Sensado de Temperatura Constante

Las pruebas fueron realizadas utilizando dos (2) sistemas diferentes de calentamiento:

- Plancha de Calentamiento
- Horno Microondas

Estos medios de calentamiento tienen una diferencia que radica en que la plancha de calentamiento no produce campos electromagnéticos que afecten el desempeño de la termocupla cuando se encuentra activa; lo contrario sucede con el horno microondas, cuando se encuentra activo produce campos electromagnéticos variables de gran intensidad.

El emplear estos dos métodos de calentamiento permite determinar si el error producido por el equipo de medida con termocupla es debido a la presencia de campos electromagnéticos o es inherente del sistema de medida, específicamente en el hardware.

7.2.1. EQUIPOS DE CALENTAMIENTO

7.2.1.1. Horno Microondas:

En el desarrollo de las pruebas se utilizó un horno microondas convencional. En la tabla 6 se presentan las características del horno microondas con sus respectiva imagen.

Tabla 6 Características Hornos

Marca	LG MS-1242ZK
Potencia de Magnetron	1200 W
Cavidad	33cm*33cm*21cm
Fotografía	

Fuente Autores

7.2.1.2. Plancha de Calentamiento

Para realizar las pruebas sin presencia de campos electromagnéticos que afecten el desempeño de la termocupla, se utilizó una plancha de calentamiento con las características presentadas en la tabla 7, y mostrada en la figura 47.

Tabla 7. Características de la Plancha Térmica

Marca	Alimentación	Frecuencia	Potencia	Type
Ceran-Schott	110 V~	60 Hz	1.1 kW	CK-111

Fuente Autores

Figura 47. Plancha Térmica



Fuente Autores

7.2.2. PRUEBAS A TEMPERATURA VARIABLE

7.2.2.1. Metodología para las Pruebas Utilizando como Medio de Calentamiento una Plancha Térmica:

1. Se almacena agua (400ml) en un recipiente.
2. Se realiza el calentamiento del agua usando una plancha térmica.
3. El sensado de temperatura se hace por medio de los dos sistemas de medida (Termocupla, Fibra Óptica). Estos dos sistemas se utilizan simultáneamente para el sensado; el sensado se realiza durante el tiempo que se estableció en el algoritmo.
4. Se cambia el agua para dar inicio a una nueva prueba. Este procedimiento se repite cuando se va a dar inicio cada prueba.

7.2.2.2. Metodología para las Pruebas Utilizando como Medio de Calentamiento un horno Microondas:

1. Se almacena agua (400ml) en un recipiente.
2. Se realiza el calentamiento del agua usando un horno microondas.
3. El sensado de temperatura se hace por medio de dos sistemas de medida (Termocupla, Fibra Óptica). La estrategia empleada para realizar el sensado es la expuesta en el capítulo 6.
4. El tiempo que dura la prueba es el tiempo que configura el usuario en el algoritmo.
5. Se cambia el agua para dar inicio a una nueva prueba.

7.2.2.3. Resultados De Las Pruebas Con Temperatura Variable Utilizando Como Medio Calentador Una Plancha Térmica

El montaje utilizado para el desarrollo de estas pruebas se presenta en la figura 48.

Figura 48. Montaje para Realización de Pruebas con Plancha



Fuente: Autores

Antes de presentar estos resultados es conveniente aclarar la convención utilizada para las graficas:

Temperatura: T (°C)

Tiempo : t (s)

Termocupla : T_m

Fibra Óptica: F_o

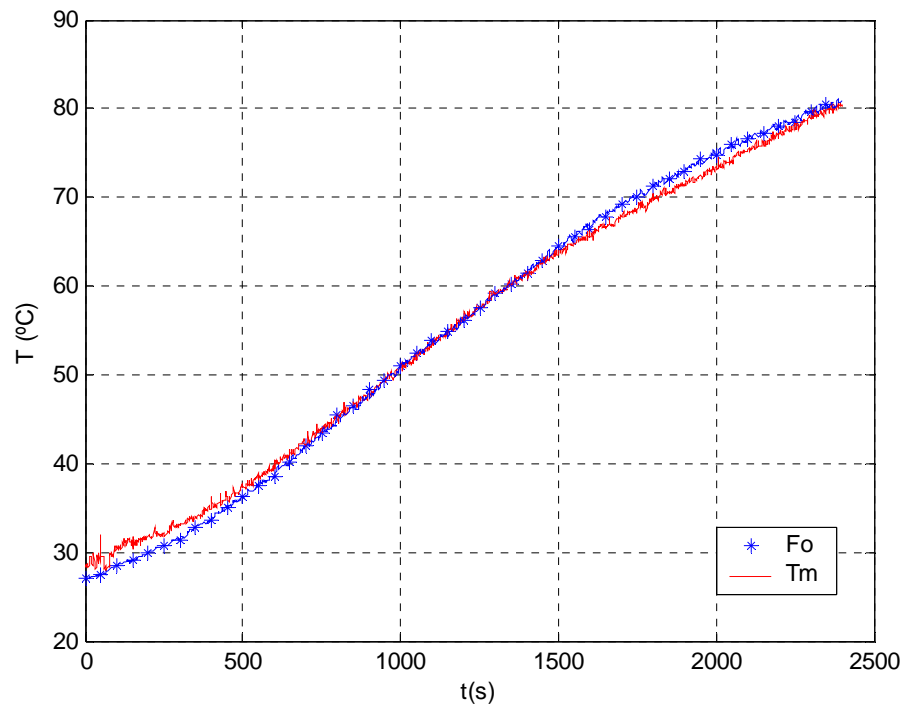
A continuación se presentan los resultados obtenidos en tres (3) pruebas realizadas, se presentan gráficas. En la elaboración de las graficas correspondientes a la fibra

óptica y a la termocupla se toman los datos almacenados por el algoritmo desarrollado en Labview.

- Prueba 1

Tiempo total de la prueba: 2400 (s)

Figura 49. Graficas correspondientes a la prueba 1 cuando se utiliza como medio de calentamiento una plancha térmica.

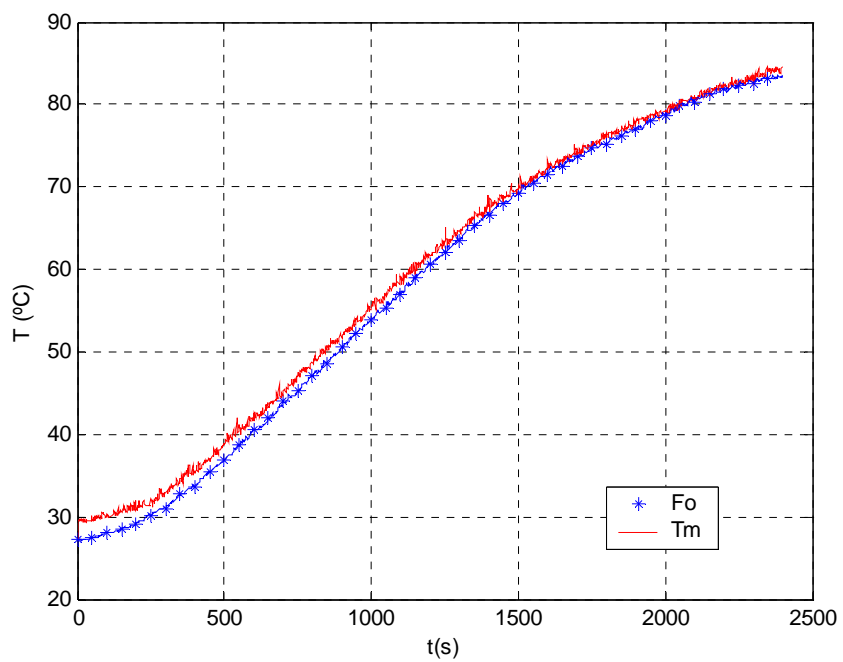


Fuente: Autores

- Prueba 2

Tiempo total de la prueba: 2400 (s)

Figura 50. Graficas correspondientes a la prueba 2 cuando se utiliza como medio de calentamiento una plancha térmica.

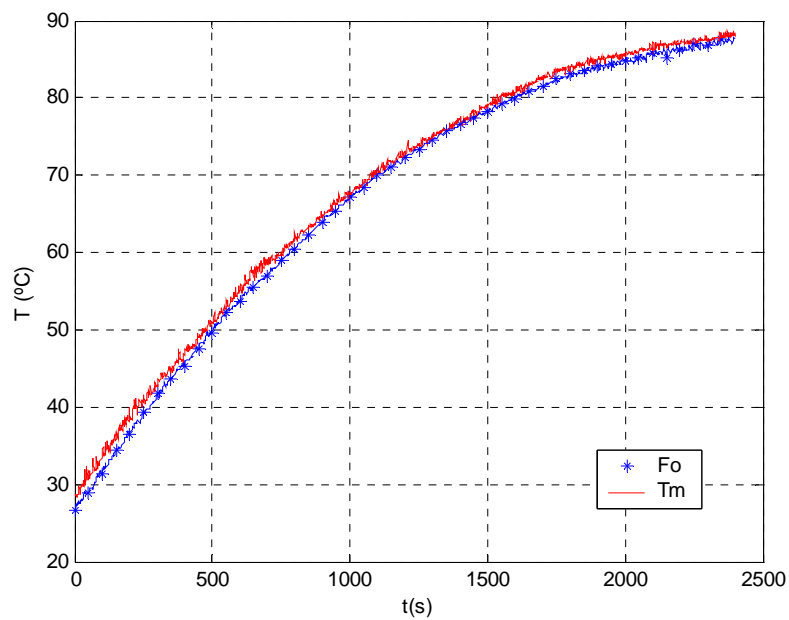


Fuente: Autores

- Prueba 3

Tiempo total de la prueba: 2400 (s)

Figura 51. Graficas correspondientes a la prueba 3 cuando se utiliza como medio de calentamiento una plancha térmica.



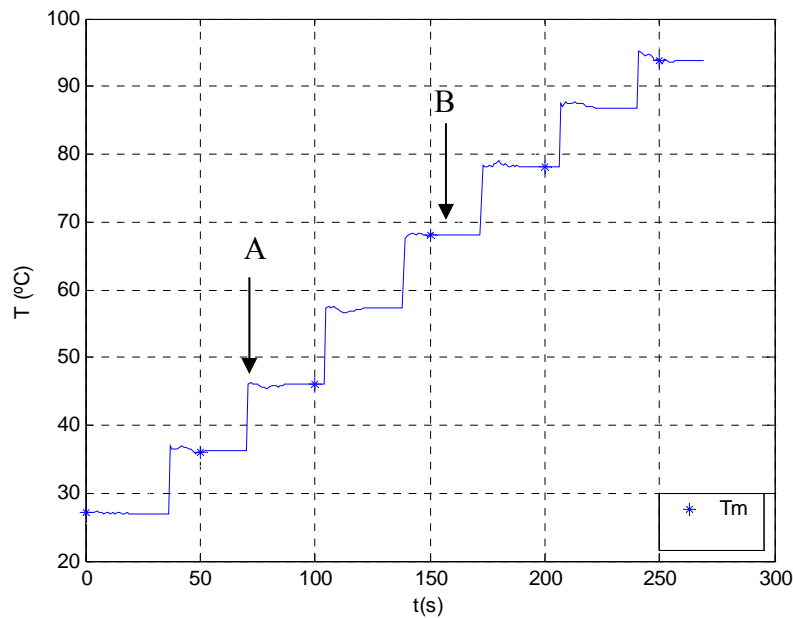
Fuente: Autores

En las figuras 49, 50, 51; se observa que el sistema de sensado de temperatura por medio de termocupla sigue la tendencia del equipo patrón UMI, además el error máximo presentado en las pruebas fue de 3 °C que es aceptable para la aplicación que se trabajo.

7.2.2.4. Resultados de las Pruebas en Presencia de Campos Electromagnéticos

Para interpretar mejor los resultados obtenidos en estas pruebas, se presenta en la figura 52 una grafica que permitirá visualizar y aclarar dudas que pueden surgir sobre intervalos de sensado e intervalos de apagado y encendido del magnetrón.

Figura 52. Grafica para Interpretar Resultados Obtenidos en Pruebas con Presencias de Campos Electromagnéticos.



Fuente: Autores

A: Sensado Activo, magnetrón desenergizado;

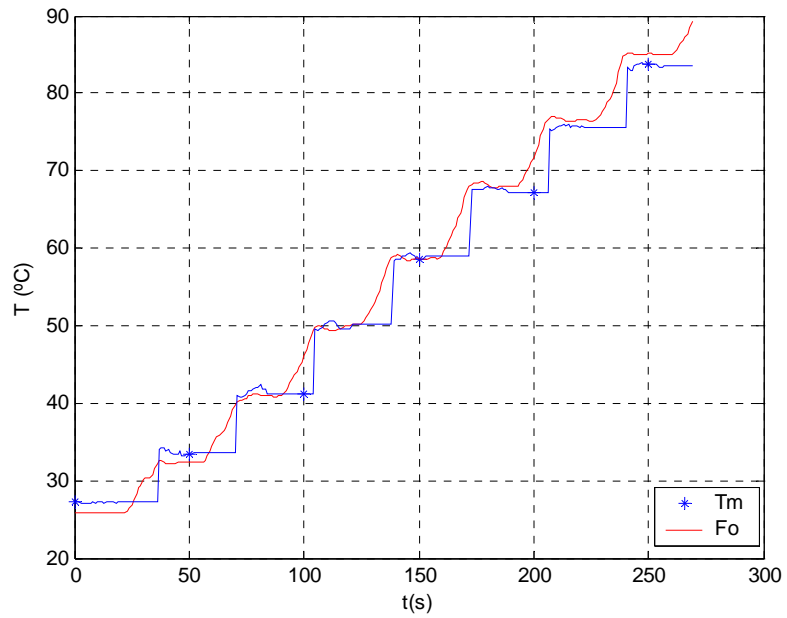
B: Sensado Desactivado, magnetrón encendido.

La convención para estas gráficas es la misma que anteriormente se mencionó, también se realizan con lo datos almacenados por el algoritmo desarrollado en Labview.

- Prueba 1

Tiempo total de la prueba: 270 (s)

Figura 53. Graficas correspondientes a la prueba 1 cuando se utiliza como medio de calentamiento un horno microondas.

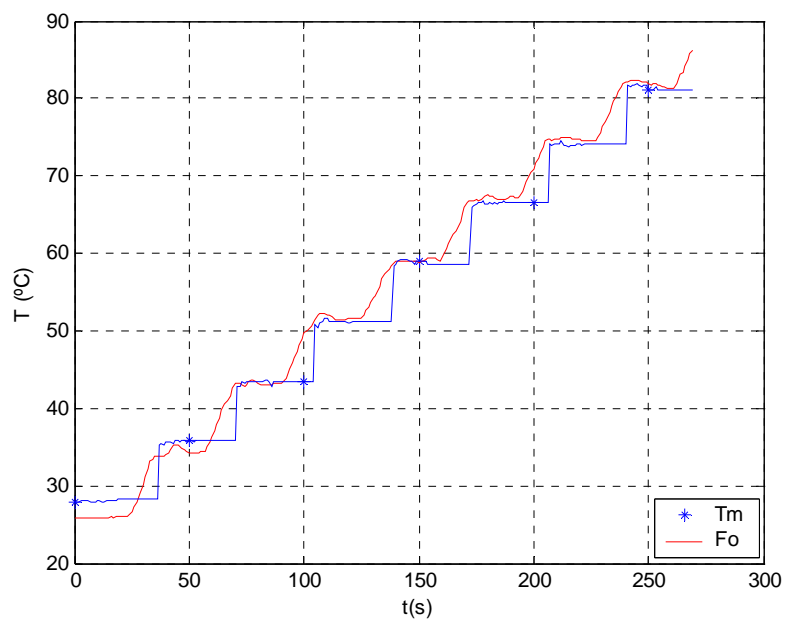


Fuente: Autores

- Prueba 2

Tiempo total de la prueba: 270 (s)

Figura 54. Graficas correspondientes a la prueba 2 cuando se utiliza como medio de calentamiento un horno microondas.

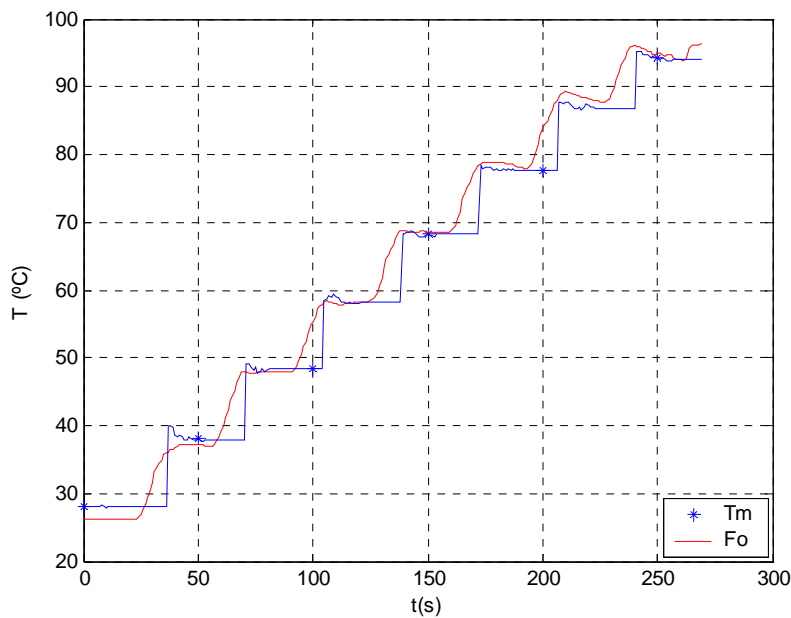


Fuente: Autores

- Prueba 3

Tiempo total de la prueba: 270 (s)

Figura 55. Graficas correspondientes a la prueba 3 cuando se utiliza como medio de calentamiento un horno microondas.



Fuente: Autores

De las figuras 53, 54 y 55 se puede observar que el sistema de medida por medio de termocupla sigue la tendencia del equipo patrón UMI; además en las partes en que esta activo el sensado se presenta una diferencia máxima de 4 °C, siendo este un error aceptable para la aplicación en la cual se va a emplear “Equipo Prototipo para reparcho de vias”.

7.2.3. PRUEBAS A TEMPERATURA AMBIENTE

7.2.3.1. Descripción de la Metodología Utilizada para el Desarrollo de las Pruebas con Temperaturas Ambiente.

1. Se deposita agua en un recipiente de almacenamiento.
2. Se deja a temperatura ambiente
3. El sensado de temperatura se realiza con el sistema de termocuplas y el sistema de fibra óptica simultáneamente.
4. El tiempo de duración de la prueba es de 3 minutos.

7.2.3.2. Resultados de las Pruebas a Temperatura Ambiente

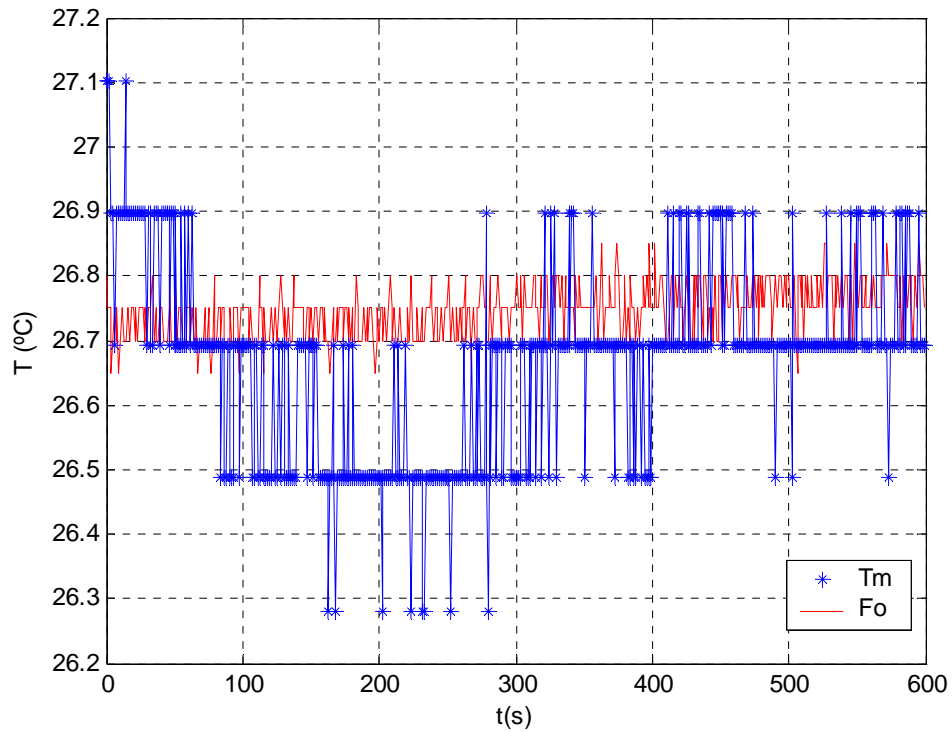
Esta prueba se realiza con el objetivo de determinar la oscilación propia del sistema y determinar porque la tendencia de la temperatura obtenida por el sistema de termocupla presenta diferencias con el equipo patrón. Para esta parte se realizaron dos pruebas, cuyos resultados se presentan en las figuras 56 y 57.

En las figuras 56 y 57 se debe tener en cuenta que la escala de temperatura se encuentra entre 26 y 28 grados centígrados, también que la tendencia que se encuentra en la parte superior de dichas graficas corresponde al sistema de sensado por medio de termocuplas desarrollado en el presente trabajo de grado.

- Prueba 1

Tiempo total de la prueba: 600 (s)

Figura 56. Resultado Prueba 1 a temperatura Ambiente

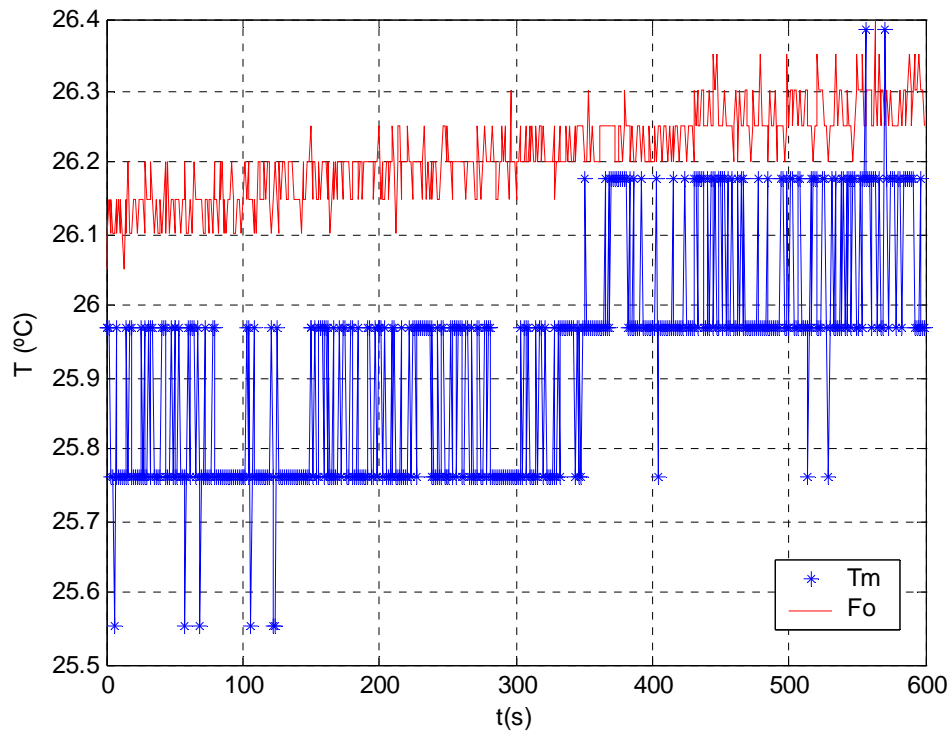


Fuente: Autores

- Prueba 2

Tiempo total de la prueba: 600 (s)

Figura 57. Resultado Prueba 2 a temperatura Constante



Fuente: Autores

En la Figuras 56 y 57 se aprecia que la tendencia del sistema de termocupla sigue al equipo patrón y presenta una diferencia no mayor de 0.7 °C, esta diferencia es propia del sistema de termocupla puesto que el acondicionador utilizado presenta un error propio de 1°C a 3°C; esta diferencia que presenta el sistema de termocupla es aceptable y buena, ya que en la aplicación final una diferencia de este tipo no representaría ningún problema en el proceso de reparcho de vías.

7.3. COMPORTAMIENTO DE LAS TERMOCUPLAS AL SER SOMETIDAS A RADIACIÓN DE MICROONDAS.

Mediante la realización de pruebas de laboratorio, empleando la estrategia descrita en el apartado 6.2 para la medición de temperatura cuando se produce calentamiento utilizando microondas, se encontró que las termocuplas se ven afectadas por la radiación, produciéndose en ellas un calentamiento que posiblemente depende de variables como el tiempo de exposición a radiación, el material que es calentado, la ubicación del material y de la termocupla en la cavidad, entre otras. Debido a que estas condiciones no son fáciles de mantener entre una prueba y otra, el calentamiento inducido en la termocupla es difícilmente predecible, obteniendo así sobrecalentamientos por encima de los 100°C, o unas cuantas decenas entre una prueba y otra.

A continuación se describen algunas pruebas realizadas para ilustrar el comportamiento del calentamiento inducido en las termocuplas, al estar en el interior de una cavidad con presencia de radiación de microondas.

Las pruebas realizadas fueron:

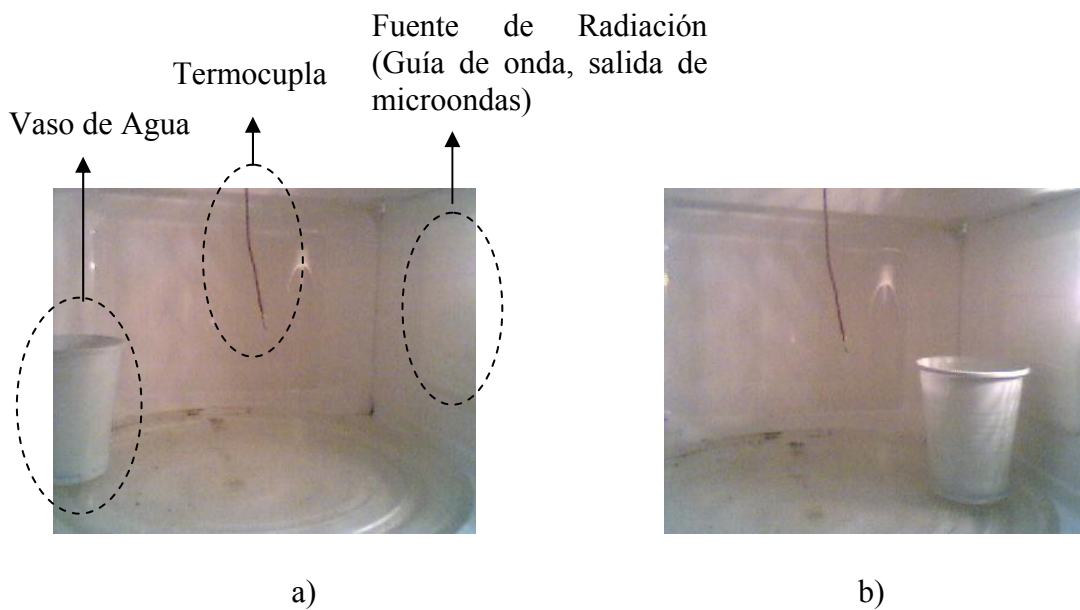
1. Termocupla en el interior de la cavidad pero fuera de la muestra.
2. Termocupla en el interior de la cavidad y en el interior de la muestra.

3. Termocupla en el interior de la muestra, siendo ésta una de las paredes de la cavidad.

7.3.1. TERMOCUPLA EN EL INTERIOR DE LA CAVIDAD PERO FUERA DE LA MUESTRA

En estas pruebas el material calentado fue un vaso de agua, el cual se ubicó entre prueba y prueba en distintos lugares en el interior de la cavidad. La termocupla fue posicionada suspendida en el centro de la cavidad como se muestra en la figura 58.

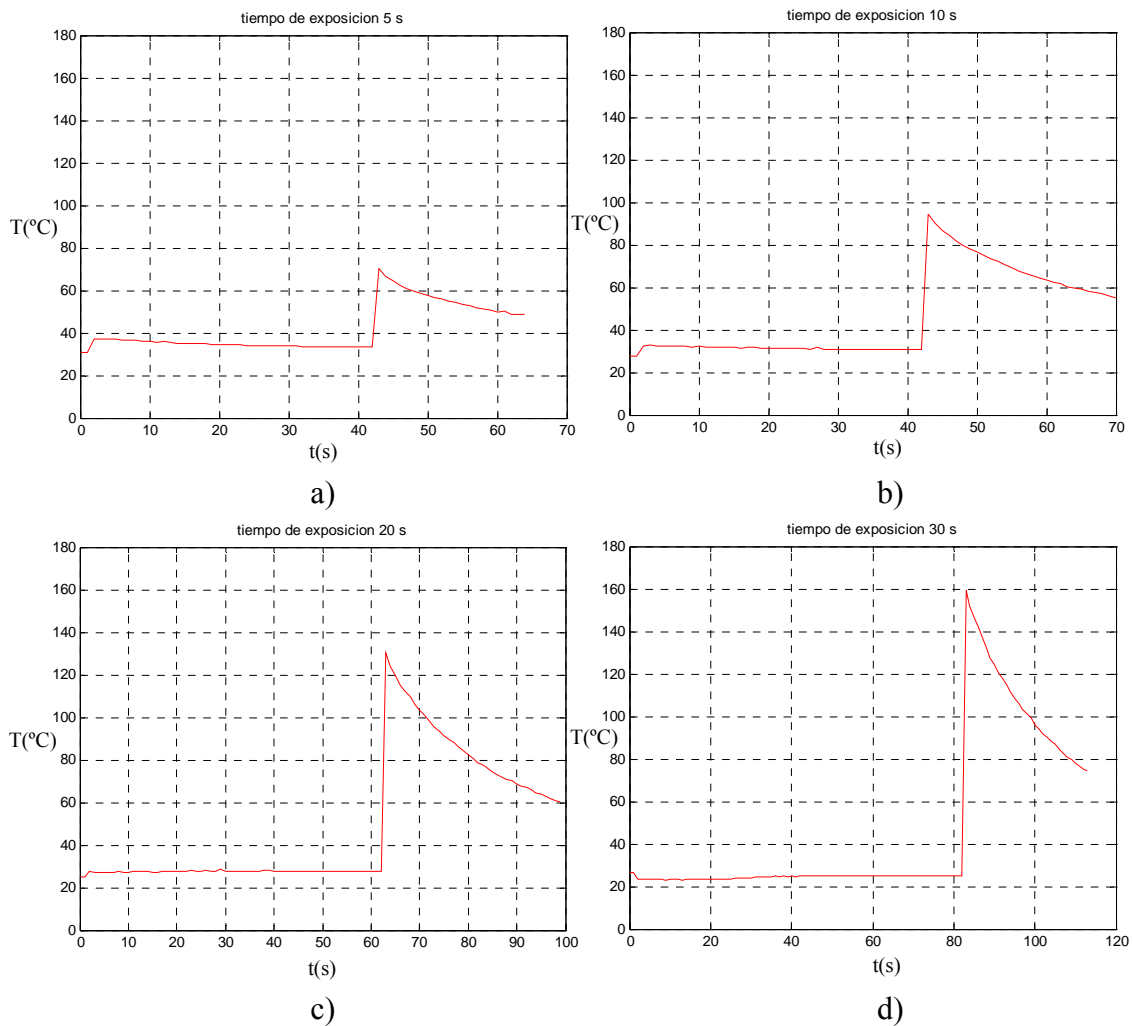
Figura 58. Ubicación del vaso de agua y la termocupla. a) Termocupla entre la fuente de radiación y el vaso de agua. b) vaso de agua entre la termocupla y la fuente de radiación.

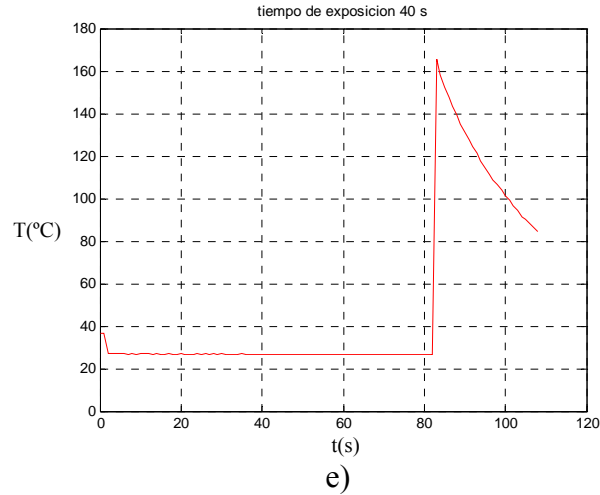


Fuente: Autores

Para la distribución mostrada en la figura 58a, se varió el tiempo de exposición y se registraron las temperaturas que se muestran en la figura 59.

Figura 59. Temperaturas alcanzadas por la termocupla con la distribución de la figura 58a. a) Tiempo de exposición 5s. b) Tiempo de exposición 10s. c) Tiempo de exposición 20s. d) Tiempo de exposición 30s e) Tiempo de exposición 40s.



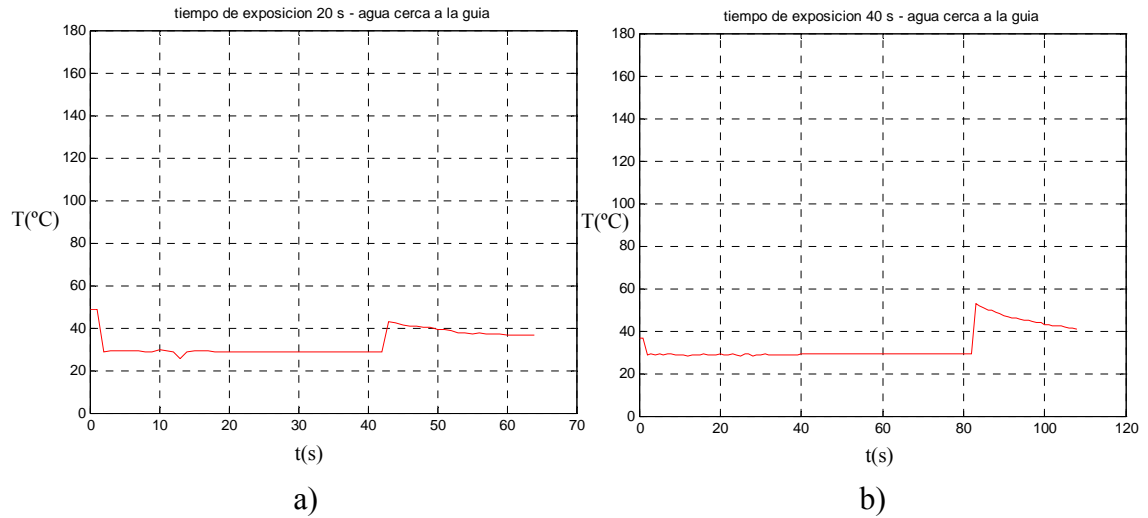


Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 59, la temperatura alcanzada por la termocupla tiene una relación directa con el tiempo de exposición a microondas, esto es, si aumenta el tiempo de exposición, aumenta la temperatura alcanzada por la termocupla. También se observa que la temperatura en el elemento de medida tiene una cota, la cual se encuentra alrededor de 160°C , esto significa que si se aumenta el tiempo de exposición la temperatura inducida no sobrepasará los 160°C . El comportamiento anterior se mantiene siempre y cuando la termocupla este en el mismo lugar; si se altera la distribución mostrada en la figura 58a, por mas pequeño que sea el cambio, el comportamiento térmico cambiará, dado que se alterara la distribución del campo en el interior de la cavidad.

Con la distribución mostrada en la figura 58b, se varió el tiempo de exposición y se registraron las temperaturas que se muestran en la figura 60.

Figura 60. Temperaturas alcanzadas por la termocupla con la distribución de la figura 58b. a) Tiempo de exposición 20s. b) Tiempo de exposición 40s.



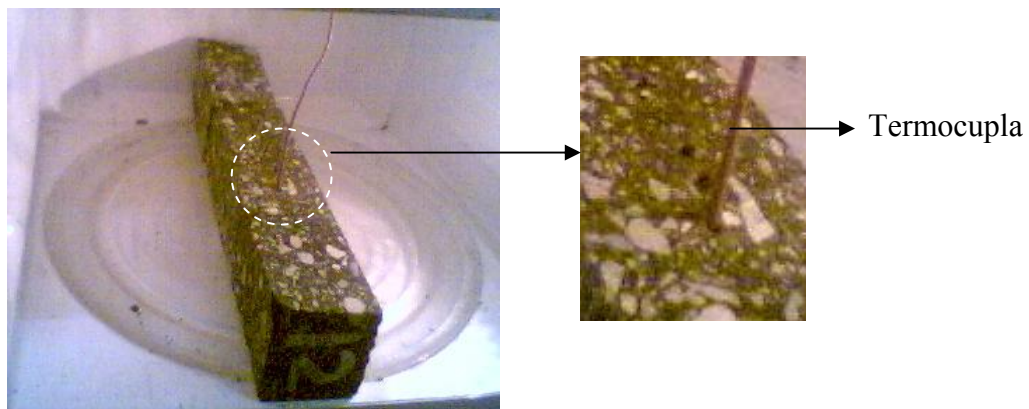
Fuente: Autores

Se continua manteniendo la relación directa entre la temperatura inducida en la termocupla por acción de las microondas y el tiempo de exposición; de los resultados obtenidos con las dos distribuciones anteriores podemos suponer que la distribución y ubicación de los elementos en el interior de la cavidad (Termocupla y material a calentar), afectan el calentamiento que se induce en la termocupla por la acción de las microondas.

7.3.2. TERMOCUPLA EN EL INTERIOR DE LA CAVIDAD Y EN EL INTERIOR DE LA MUESTRA

El material usado en estas pruebas fue pavimento, y se ubicó en el interior de la cavidad como se muestra en la figura 61.

Figura 61. Ubicación de la muestra de pavimento en el interior de la cavidad.



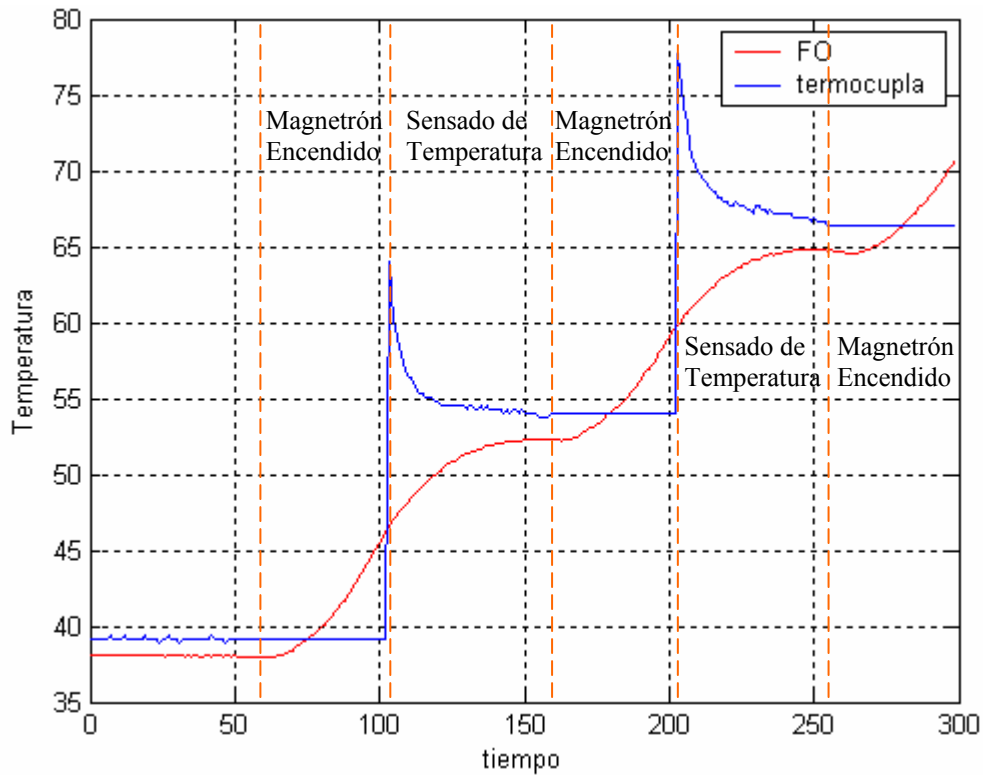
Fuente: Autores

En la figura 62 se aprecia el efecto de las microondas sobre la termocupla cuando se calienta una muestra de asfalto en el interior de la cavidad, ubicada como se muestra en la figura 61.

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- FO – Es la temperatura en grados centígrados (°C) registrada utilizando el UMI (Universal Multichannel Instrument).
- Termocupla – Es la temperatura en grados centígrados (°C) registrada por la termocupla.
- Tiempo – Tiempo transcurrido en segundos.
- Temperatura – Temperatura en grados centígrados (°C).

Figura 62. Efecto de las microondas sobre la termocupla cuando se calienta una muestra de asfalto en el interior de la cavidad.



Fuente: Autores

Como se observa en la figura anterior, los picos de temperatura en la termocupla disminuyen con una tendencia exponencial, hasta estabilizarse en la temperatura a la cual se encuentra el material, en este caso la temperatura del pavimento.

La magnitud de los picos de temperatura depende de la composición y de la distribución del material, y de la ubicación de este en el interior de la cavidad; haciendo que al calentar pavimento, estos picos sean difícilmente predecibles entre pruebas que utilicen diferentes muestras de pavimento, ya que la distribución de los elementos que las componen no es homogénea.

7.3.3. TERMOCUPLA EN EL INTERIOR DE LA MUESTRA, SIENDO ÉSTA UNA DE LAS PAREDES DE LA CAVIDAD.

Esta prueba se hizo con el fin de predecir como se comportaría la termocupla en condiciones muy similares a las que se presentarán al ser utilizada en un prototipo de reparcho de vías.

La cavidad del horno fue ubicada cómo se muestra en la figura 63, haciendo de la muestra de pavimento una de las caras de la cavidad (la puerta del horno microondas fue removida y este fue ubicado boca abajo sobre la muestra de pavimento). La termocupla fue introducida en un agujero de 0.4cm de diámetro y 8cm de

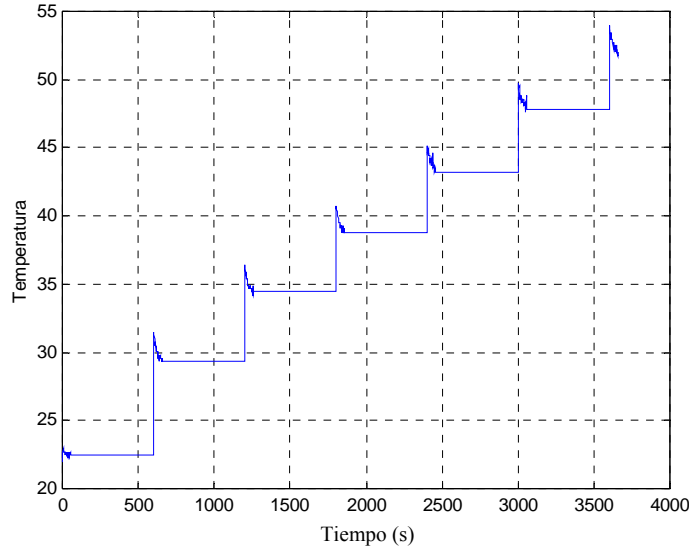
profundidad, realizado en la muestra utilizando un taladro; los resultados de esta prueba se muestran en la figura 64.

Figura 63. Ubicación de la cavidad sobre la muestra de pavimento.



Fuente: Autores

Figura 64. Temperaturas en grados centígrados registradas por medio de termocupla al radiar una muestra que actúa como una de las caras de la cavidad.



Fuente: Autores

El efecto de calentamiento propio de la termocupla por estar sometida a radiación de microondas también se presenta en este tipo de pruebas, pero es mucho menor al que se produce en el interior de la cavidad resonante; esto puede ser debido a que al remplazar una de las caras de la cavidad ya no hay resonancia y por ello la magnitud del campo eléctrico es menor. Además la relación del volumen de la termocupla con respecto al pavimento es mucho menor, haciendo que el pavimento absorba una mayor cantidad de microondas.

El calentamiento de la termocupla por acción de las microondas puede causar confusión a la hora de observar la temperatura del material que esta siendo sometido

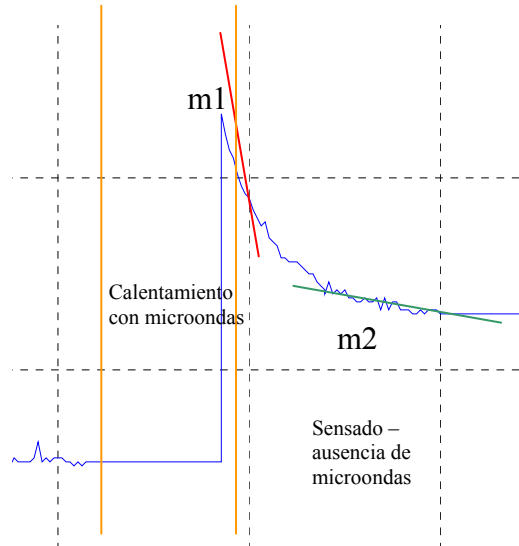
a calentamiento, para evitar este problema se desarrollo una opción que visualiza los datos que el usuario considera confiables; esta opción se describe a continuación.

7.4. VISUALIZACIÓN DE DATOS CONFIABLES

Al apagar el magnetron e iniciar el sensado de temperatura se registra el calentamiento propio de la termocupla y no del material; la temperatura de la termocupla desciende con una tendencia exponencial hasta la temperatura a la cual se encuentra el material calentado; teniendo en cuenta este comportamiento se desarrollo la opción de visualización con ajuste, con la cual se visualiza la temperatura ya estabilizada de acuerdo al criterio del usuario.

Esta opción funciona de la siguiente manera: como la temperatura en la termocupla decrece con una tendencia exponencial, la pendiente de esta curva empezará siendo negativa y de gran magnitud, e ira disminuyendo hasta estabilizarse y obtener un valor cercano a cero (figura 65).

Figura 65. Variación de la pendiente en la curva de temperatura registrada con termocupla.



Fuente: Autores

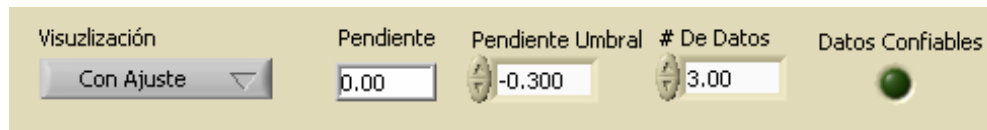
En la figura 65 se aprecia que la pendiente $m1$ en el inicio del sensado es mayor en magnitud que la pendiente $m2$; se puede concluir que una pendiente negativa de gran magnitud al inicio del periodo de sensado, indica que se esta registrando temperatura propia de la termocupla al ser radiada con microondas y no la del material que esta siendo radiado. Así mismo que una pendiente pequeña indica que la temperatura de la termocupla se ha estabilizado a la temperatura del material y los datos obtenidos son confiables.

La pendiente se calcula por medio de regresión lineal con los últimos datos de la curva; el usuario define con cuantos puntos realizar la regresión y cual es el valor de la pendiente $m2$ que debe alcanzar la curva para a partir de ese punto visualizar datos.

Con este método se tiene la seguridad de que es la temperatura del material la que se esta registrando y no la de la termocupla por efecto de la radiación.

En la figura 66 se puede observar la opción que se incluyó en los algoritmos desarrollados en labVIEW para visualizar la curva con o sin ajuste.

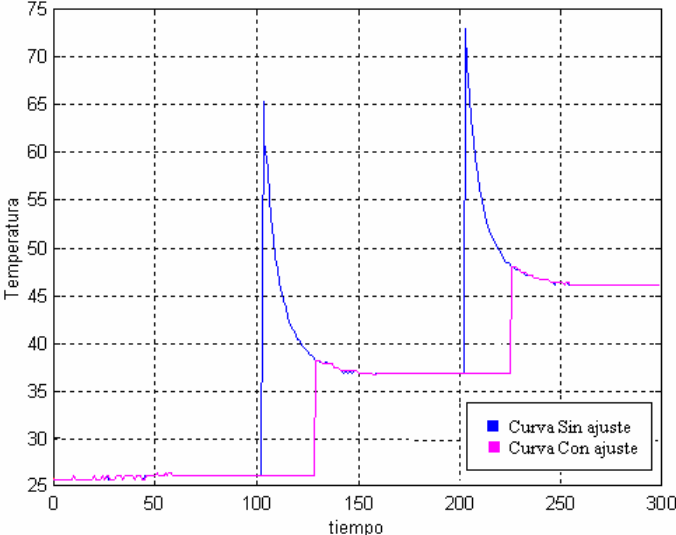
Figura 66. Opción de los algoritmos desarrollados en labview que permite hacer la visualización de datos confiables después de haber realizado calentamiento con microondas.



Fuente: Autores

A continuación se muestran las curvas de temperatura con y sin ajuste registradas al someter una muestra de pavimento en el interior de la cavidad resonante (Figura 67).

Figura 67. Curvas de temperatura con y sin ajuste registradas al someter una muestra de pavimento en el interior de la cavidad resonante.



Fuente: Autores

8. COMPORTAMIENTO TERMICO DE MUESTRAS DE PAVIMENTO AL SER CALENTADAS POR MEDIO DE MICROONDAS EN UNA CAVIDAD RESONANTE

Esta sección presenta perfiles térmicos de muestras de pavimento al ser calentadas por medio de microondas dentro de una cavidad resonante.

Los perfiles térmicos de las muestras de pavimento fueron obtenidos con el equipo de acondicionamiento y adquisición de datos UMI (Universal Multichannel Instrument).

8.1. ASPECTOS GENERALES

Las pruebas consisten en someter a radiación de microondas muestras de pavimento en el interior de un horno microondas convencional, para registrar el calentamiento inducido y corroborar la interacción microondas-pavimento ya reportada en el trabajo de grado “Diseño y Construcción de un Equipo para Tratamiento Térmico de Pavimento”

Las características del horno utilizado se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Características del horno microondas utilizado en las pruebas.

Marca	LG MS-1242ZK
Potencia de Magnetron	1200 W
Cavidad	33cm*33cm*21cm
Fotografía	

Fuente: Manual de Usuario Microondas LG

A continuación se muestra la convención utilizada en el interior de la cavidad para referirnos a la ubicación de la muestra (Figura 68).

Figura 68. Convención utilizada en la cavidad del horno.



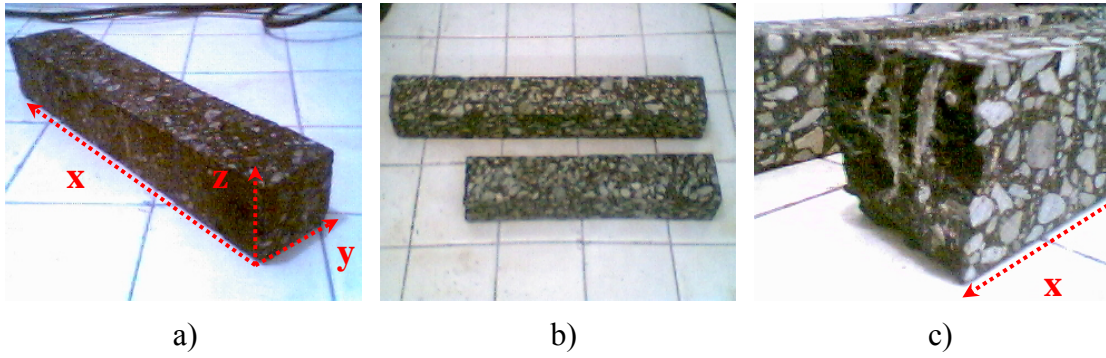
Fuete: Autores.

8.2. PARTE EXPERIMENTAL

8.2.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras de pavimento usadas tienen forma de paralelepípedo tal como se muestra en la figura 69a, en donde también se puede apreciar la convención establecida para referirnos a la geometría de las mismas; éste eje coordenado fue ubicado de manera que siempre fuese mayor la distancia en y que en z . Estas muestras originalmente tenían una longitud en x de 44cm, que fue reducida aproximadamente a 32cm (Figura 69b) para poder ubicar las muestras con su eje x paralelo al eje x o y de la cavidad, el proceso de corte se llevó a cabo de la siguiente manera, calentando cada una de las muestras por un periodo de tiempo de 1.5min en el horno microondas, para ablandarla y poder partirlas con la ayuda de un clavo y un martillo en la distancia x deseada (Figura 69c).

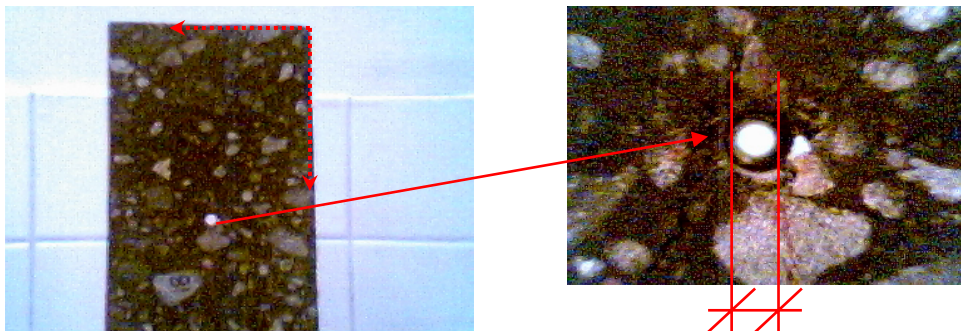
Figura 69. a) Forma y convención de medida de las muestras, b) muestras, sin corte y cortada, c) superficie del corte.



Fuente: Autores.

Para realizar la medida de temperatura en las muestras de pavimento se hicieron perforaciones igualmente espaciadas, a lo largo de x y a la mitad de y mediante un taladro con una broca de 5/32in o 0.3968cm de diámetro; los orificios perforan perpendicularmente al plano xy , y atraviesan completamente (figura 70).

Figura 70. Perforaciones realizadas a las muestras de pavimento.



Fuente: Autores.

Las perforaciones fueron numeradas de acuerdo a su posición; la número uno se encuentra mas distante en x , la número dos aquella que le sigue disminuyendo en x y así sucesivamente hasta la menos distante (Figura 71).

Figura 71. Distribución y numeración de orificios en las muestras utilizadas.



Fuente: Autores.

Los canales del UMI (Universal Multichannel Instrument) fueron asignados de acuerdo a las perforaciones; a la perforación número uno se le asignó el canal uno (CH1), a la perforación número dos se le asignó el canal dos (CH2) y así sucesivamente para todas las perforaciones.

En los orificios realizados a cada muestra se introdujo un capilar de vidrio con la capacidad de soportar de 250°C a 300°C (Figura 72), en los cuales posteriormente se introdujeron los sensores de fibra óptica, para no exponerlos a un posible contacto con sustancias corrosivas o adherentes que pudieran causar un mal funcionamiento o destrucción del sensor. Cada capilar tiene aproximadamente 10cm de largo y sus diámetros interno y externo son 0.25cm y 0.4cm respectivamente.

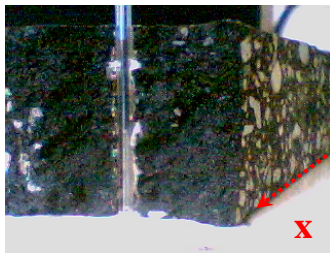
Figura 72. Capilares de vidrio usados para proteger los sensores.



Fuente: Autores.

Los sensores se ubicaron de manera que la cubierta de estos quedara totalmente introducida en el interior de la muestra. La punta de los sensores quedó aproximadamente a una profundidad de 0.28cm a partir de la cara superior de la muestra (figura 73).

Figura 73. Ubicación de los sensores en el interior de la muestra. a) Vista de corte en el plano yz de la muestra. b) Vista de la cara superior de la muestra.



a)



b)

Fuente: Autores

8.3. TIPOS DE PRUEBAS

Se realizaron cinco tipos de pruebas obteniendo de cada una de ellas su perfil térmico:

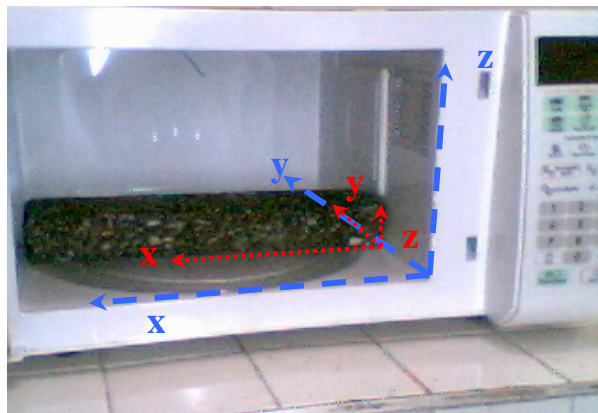
1. **Tipo Uno:** Cada muestra fue ubicada en una determinada posición dentro del horno y calentada hasta su destrucción.
2. **Tipo Dos:** Las muestras fueron calentadas en el interior de la cavidad ubicándolas en diferentes posiciones.
3. **Tipo Tres:** Se realizaron pruebas de reproducibilidad a una misma muestra tratando de mantener las mismas condiciones en cada una de las pruebas.
4. **Tipo Cuatro:** Se realizaron pruebas con una sola muestra variando la temperatura de inicio, manteniendo la ubicación constante dentro de la cavidad del horno.
5. **Tipo cinco:** En esta prueba se expuso una muestra a radiación dentro de una cavidad modificada para radiar simultáneamente con dos magnetrones.

8.4. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

8.4.1. PRUEBAS TIPO UNO

Cada una de las siguientes pruebas fue realizada con una muestra de pavimento diferente; las muestras fueron ubicadas en la cavidad de la manera como se puede observar en la figura 74, con el eje x de la muestra paralelo y en la misma dirección al eje x de la cavidad, y el eje y de la muestra paralelo y en la misma dirección al eje y de la cavidad; las pruebas fueron realizadas a distancias de 10, 15, 20 y 25cm desde el origen de referencia de la cavidad en la dirección del eje y . Se llevaron a cabo de 3 a 5 pruebas para cada una de las distancias anteriormente mencionadas.

Figura 74. Ubicación de las muestras de pavimento para las pruebas tipo uno.



Fuente: Autores

Las dimensiones y nombres de cada una de las muestras usadas en estas pruebas se muestran en la Tabla 9 así como la distribución de los orificios.

Tabla 9. Geometría y distribución de orificios de las muestras usadas en las pruebas tipo uno.

Medidas Generales				Orificios					
Muestra	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Uno		Dos		Tres	
				x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
Pavimento 1	31.40	6.30	4.30	23.50	3.00	15.80	3.60	7.70	3.00
Pavimento 2	31.00	6.30	4.00	23.70	3.10	16.00	3.00	7.70	3.30
Pavimento 3	32.00	6.40	4.70	24.10	3.20	16.00	3.60	7.90	2.90
Pavimento 4	31.20	6.30	4.80	23.70	3.30	15.60	3.00	7.70	3.20
Pavimento 5	32.00	6.00	5.00	24.00	3.00	15.50	3.30	7.50	3.00
Pavimento 6	31.80	6.50	4.00	23.70	3.30	16.00	3.30	7.50	3.80
Pavimento 7	31.00	6.00	4.20	23.60	2.60	16.00	3.00	8.00	2.80
Pavimento 8	31.20	6.20	5.00	24.20	3.60	15.50	3.20	7.90	3.20
Pavimento 9	31.00	6.40	5.80	23.70	3.20	15.70	3.20	7.50	2.90
Pavimento 10	31.20	6.00	4.50	23.30	2.70	15.70	2.80	7.60	2.80
Pavimento 11	31.00	6.40	4.30	23.80	3.40	15.50	2.90	7.50	3.00
Pavimento 12	32.00	6.40	4.30	24.50	3.30	17.00	3.50	8.60	3.60
Pavimento 13	32.20	6.10	4.70	23.70	3.20	16.00	3.10	7.70	3.50
Pavimento 14	31.20	6.20	4.40	23.60	3.30	16.00	3.50	7.60	3.30
Pavimento 15	31.50	6.30	4.50	23.90	3.00	16.50	3.00	8.50	3.30
Pavimento 16	31.50	6.30	5.20	23.70	3.00	16.30	2.90	8.00	3.10
Pavimento 17	32.00	6.20	5.00	24.20	3.50	15.50	3.10	8.00	3.10
Promedio	31.48	6.25	4.63	23.82	3.16	15.92	3.18	7.82	3.16

Fuente: Autores.

En cada una de estas pruebas las muestras fueron calentadas por exposición a microondas partiendo de temperatura ambiente, por un tiempo promedio de 4.8 minutos o 288 segundos, el cual es suficiente para que la muestra se agriete y ablande a tal punto de poder destruirla usando una sola mano (Figura 75).

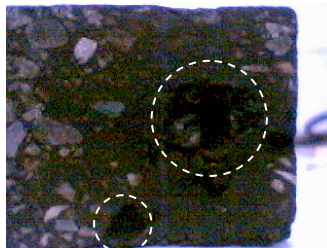
Figura 75. Destrucción de una muestra usando solo una mano después de someterla a calentamiento con microondas en el interior del horno por un tiempo de 5 minutos.



Fuente: Autores.

Una de las muestras durante las pruebas provocó una gran humareda en el interior de la cavidad, debido a que en la superficie se encontraban piedras susceptibles a la radiación de microondas, calentándose al punto de verse incandescente y carbonizarse completamente (figura 76).

Figura 76. Muestra que causó humaredas; en el interior de las circunferencias punteadas se muestran los lugares afectados.



Fuente: Autores.

A continuación se presentan las graficas de los datos representativos obtenidos usando la metodología anteriormente mencionada; su nomenclatura es:

Pavimento n – m: Muestra de pavimento a la que se le realizo la prueba (n) y distancia con respecto al sistema de referencia de la cavidad (m).

T : Temperatura (°C)

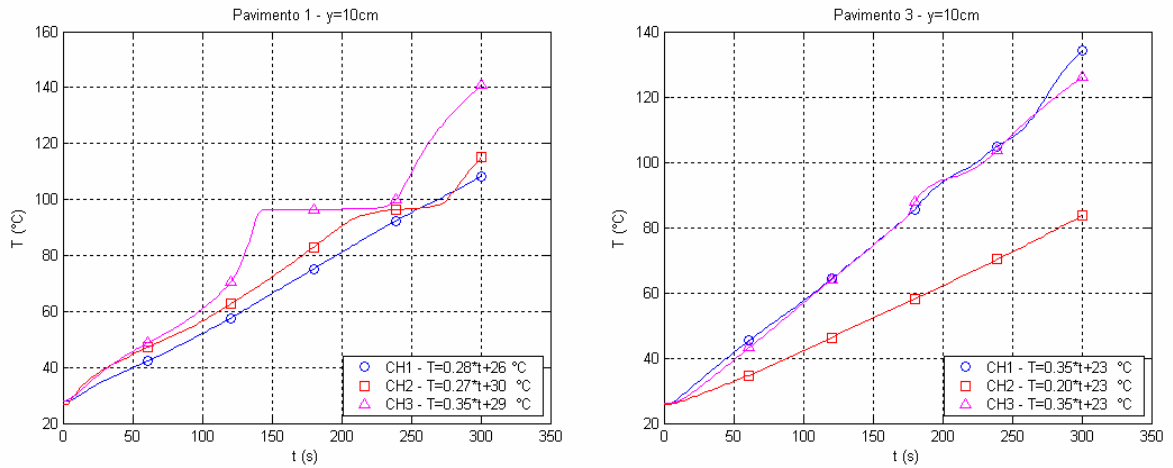
t : Tiempo (s)

CH1 – T(t): Canal 1 del UMI, correspondiente al orificio 1 de la muestra y regresión lineal de la curva.

CH2 – T(t): Canal 2 del UMI, correspondiente al orificio 2 de la muestra y regresión lineal de la curva.

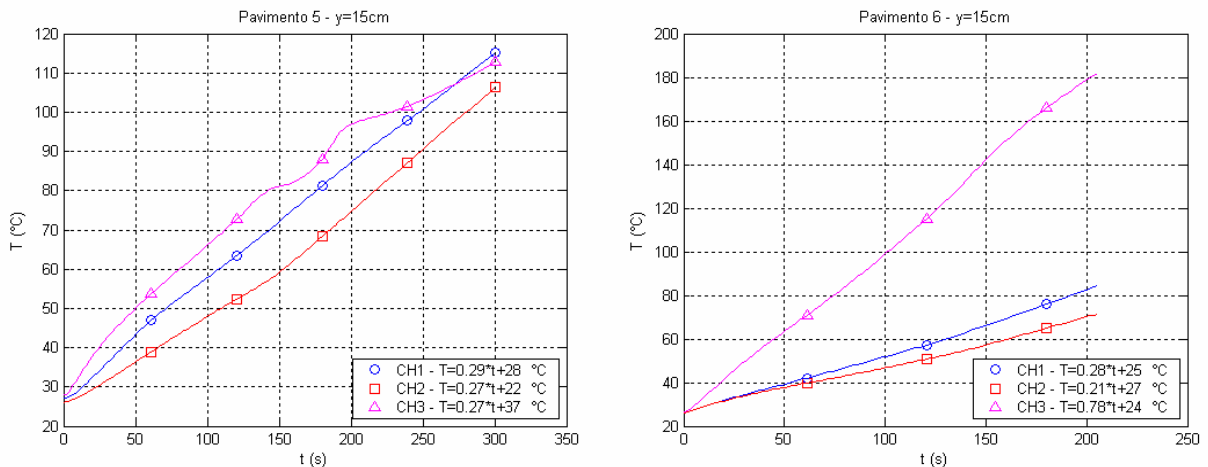
CH3 – T(t): Canal 3 del UMI, correspondiente al orificio 3 de la muestra y regresión lineal de la curva.

Figura 77. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras *pavimento 1* y *pavimento 3* a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 10cm en el eje y de la cavidad.



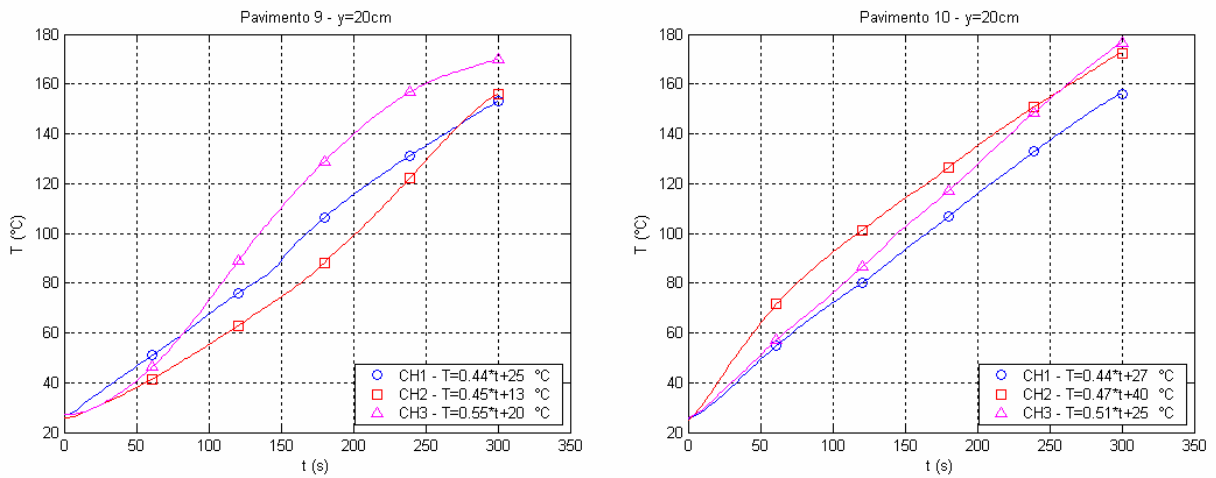
Fuente: Autores

Figura 78. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras *pavimento 5* y *pavimento 6* a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 15cm en el eje y de la cavidad.



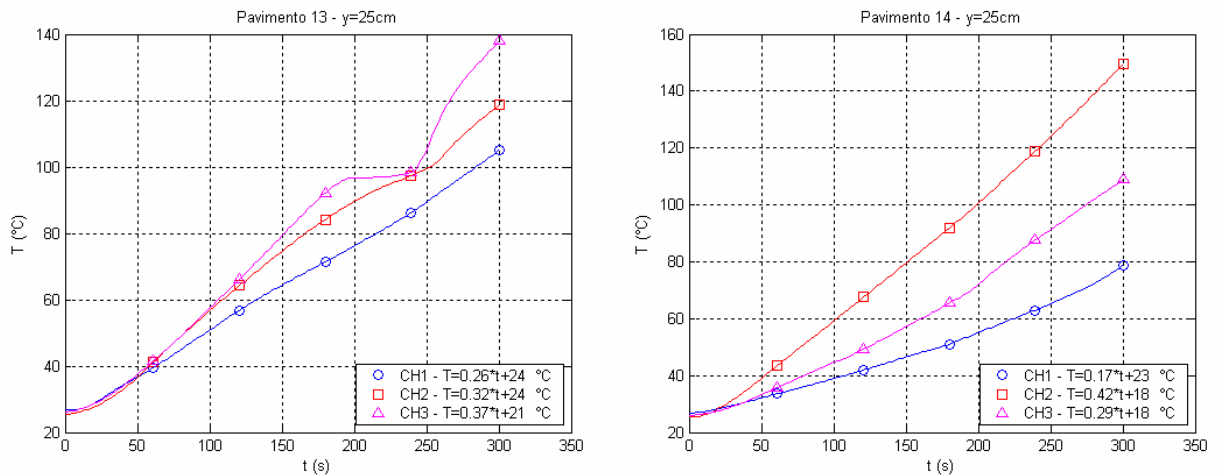
Fuente: Autores

Figura 79. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras *pavimento 9* y *pavimento 10* a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 20cm en el eje y de la cavidad.



Fuente: Autores

Figura 80. Temperaturas registradas en cada canal al someter cada una de las muestras *pavimento 13* y *pavimento 14* a calentamiento inducido por medio de microondas; ubicadas a una distancia de 25cm en el eje y de la cavidad.



Fuente: Autores

A pesar de realizar las pruebas manteniendo las mismas condiciones, los perfiles de temperatura de una muestra a otra pueden ser totalmente diferentes y no seguir ninguna tendencia como se puede apreciar en las figuras 77 a 80.

Las curvas de temperatura obtenidas de pruebas con muestras diferentes pero ubicadas en la misma posición, difieren unas de otras debido a que el calentamiento en estos puntos depende de la distribución aleatoria de las sustancias que componen el material; además las propiedades del pavimento se pueden ver alteradas de prueba a prueba por la radiación.

Las muestras de pavimento al someterlas a calentamiento con microondas por un tiempo aproximado de 3.5 minutos pueden ser destruidas usando las dos manos, partiéndola a la mitad o incluso en segmentos mas pequeños. Con un tiempo de exposición entre cuatro y cinco minutos, dependiendo este de la composición y distribución de las sustancias que constituyen la muestra, esta se ablanda al punto que usando una sola mano se podría destruir totalmente.

8.4.2. PRUEBAS TIPO DOS

Como ya es conocido que los perfiles de temperatura cambian de una muestra a otra debido a la distribución de los materiales que las componen, se realizaron pruebas a cada muestra para distintas ubicaciones dentro de la cavidad del horno.

Estas pruebas se dividen en dos, las que denominamos *Pruebas Horizontales*, que son aquellas en donde las muestras se ubican con su eje x paralelo y en la misma dirección al eje x de la cavidad, y el eje y de la muestra paralelo y en la misma dirección al eje y de la cavidad (Figura 81a), y las *Pruebas Verticales*, en donde la muestras se ubican con el eje x paralelo y en la misma dirección al eje y de la cavidad y su eje y paralelo pero en sentido opuesto al eje x de la misma (figura 81b).

Figura 81. Ubicación de las muestras para las pruebas tipo dos, a) Horizontales, b) Verticales.



Fuente: Autores.

Cada una de las muestras fue sometida a pruebas horizontales y verticales, partiendo de temperatura ambiente y finalizando cuando la temperatura alcanzada en cualquiera de los puntos de medida fuera de 70°C, esto para evitar que la muestra se destruyera por las altas temperaturas y poder realizar otra prueba con la misma muestra pero en diferente posición.

Las dimensiones y nombres de cada una de las muestras usadas en estas pruebas se muestran en la Tabla 10 así como la distribución de los orificios.

Tabla 10. Geometría y distribución de orificios de las muestras usadas en las pruebas tipo dos.

Muestra	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Uno		Dos		Tres		Cuatro	
				x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
Pavimento 18	32.00	6.20	4.80	26.10	3.20	19.70	3.10	13.00	3.20	6.40	2.80
Pavimento 19	32.00	6.50	4.30	25.70	3.40	19.00	3.20	12.90	3.30	6.30	3.30
Pavimento 20	32.00	6.50	5.00	26.00	3.20	19.20	3.10	13.30	3.20	6.40	3.10
Pavimento 21	32.00	5.70	4.50	25.30	3.10	19.40	2.80	12.50	3.00	6.00	3.00
Promedio	32.00	6.23	4.65	25.78	3.23	19.33	3.05	12.93	3.18	6.28	3.05

Fuente: Autores.

8.4.2.1 Pruebas Horizontales

Las pruebas horizontales se realizaron ubicando cada una de las muestras a 10cm, 15cm, 20cm y 25cm con respecto al eje y de la cavidad.

A continuación se muestran las temperaturas registradas en un mismo canal en cada una de las muestras utilizadas en las pruebas horizontales, después de haber transcurrido un tiempo de 45.6 segundos de iniciadas las pruebas. En cada gráfica se observan las temperaturas alcanzadas en un determinado canal, para las distancias a las cuales se ubicaron las muestras, observando así el efecto que tiene la ubicación en la temperatura alcanzada por la muestra.

La nomenclatura es la siguiente:

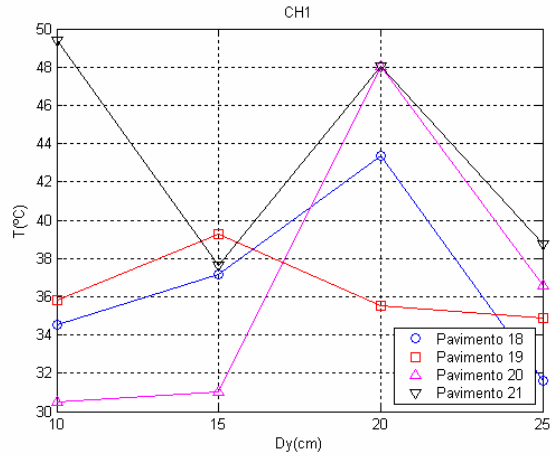
CHn: Canal al que corresponden las lecturas de temperatura.

T(°C): Temperatura medida en dicho canal al cabo de 55.2 segundos de haber iniciado la prueba.

Dy(cm): Distancia en el eje y de la cavidad a la que se encontraba la muestra.

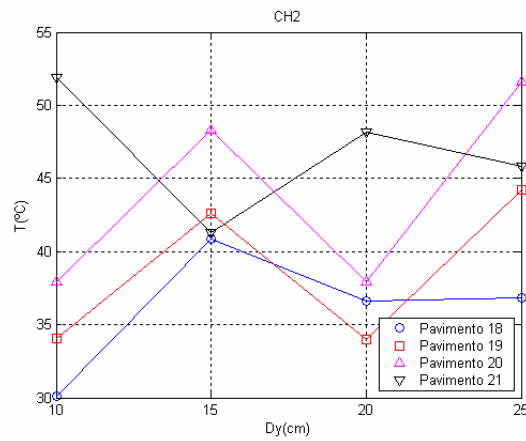
Pavimento n: Muestra a la que corresponde la medida.

Figura 82. Temperaturas registradas en el canal uno al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



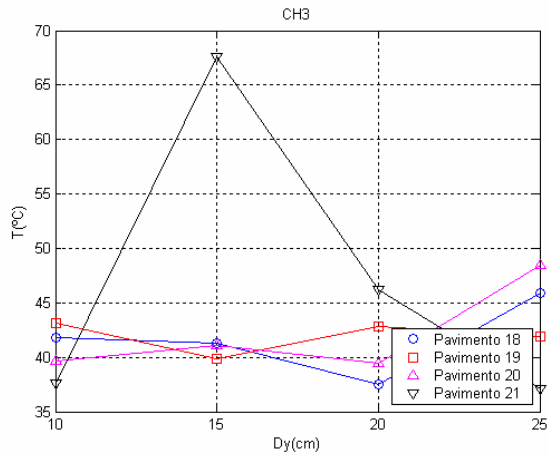
Fuente: Autores

Figura 83. Temperaturas registradas en el canal dos al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



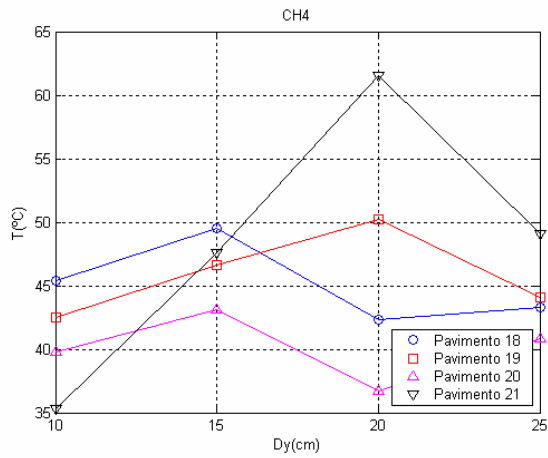
Fuente: Autores

Figura 84. Temperaturas registradas en el canal tres al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



Fuente: Autores

Figura 85. Temperaturas registradas en el canal cuatro al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



Fuente: Autores

8.4.2.2 Pruebas Verticales

Las pruebas verticales se realizaron ubicando cada una de las muestras a distancias con respecto al eje x de la cavidad de 10cm, 15cm, 20cm y 25cm.

A continuación se muestran las temperaturas registradas en un mismo canal en cada una de las muestras utilizadas en las pruebas verticales, después de haber transcurrido un tiempo de 45.6 segundos de iniciadas las pruebas. En cada gráfica se observan las temperaturas alcanzadas en un canal en particular para cada una de las distancias a las cuales se ubicaron las muestras; su nomenclatura es la siguiente:

La nomenclatura es la siguiente:

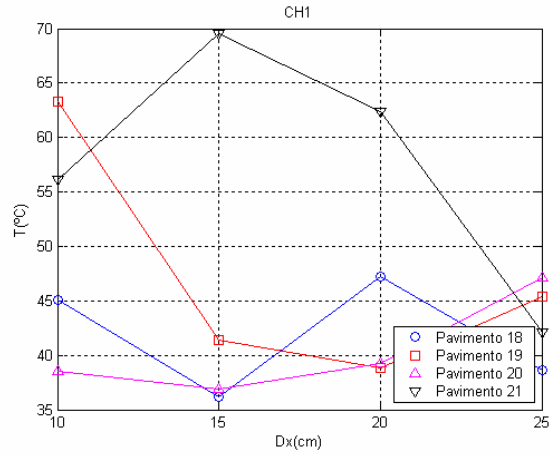
CHn: Canal al que corresponden las lecturas de temperatura.

T(°C): Temperatura medida en dicho canal al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba.

Dx(cm): Distancia en el eje x de la cavidad a la que se encontraba la muestra.

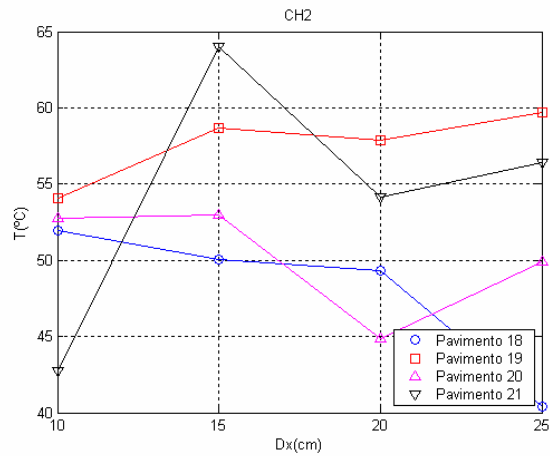
Pavimento n: Muestra a la que corresponde la medida.

Figura 86. Temperaturas registradas en el canal uno al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



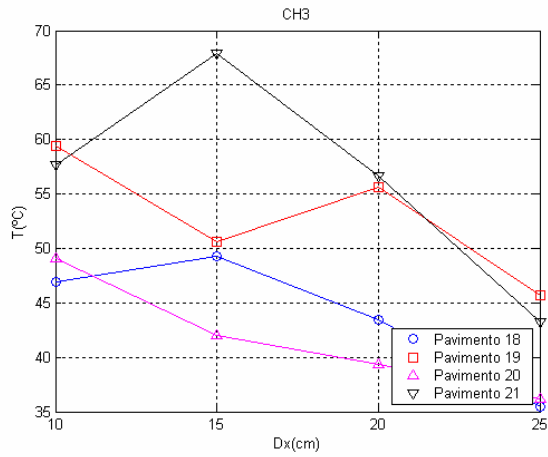
Fuente: Autores

Figura 87. Temperaturas registradas en el canal dos al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



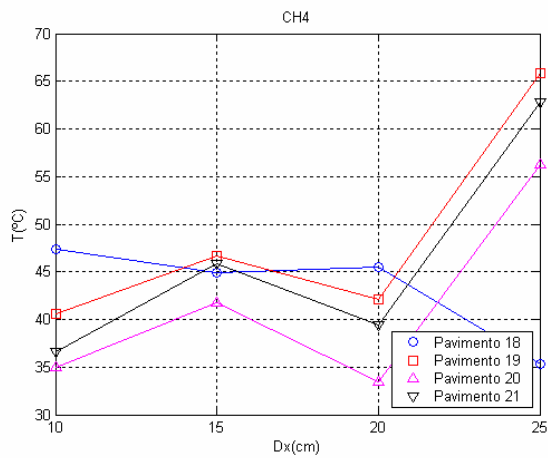
Fuente: Autores

Figura 88. Temperaturas registradas en el canal tres al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



Fuente: Autores

Figura 89. Temperaturas registradas en el canal cuatro al cabo de 45.6 segundos de haber iniciado la prueba, para las diferentes distancias a las cuales se ubicaron las muestras.



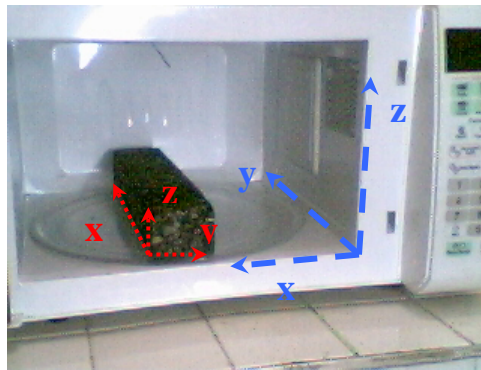
Fuente: Autores

Se puede observar una tendencia de mayor o menor calentamiento en algunos de los canales a medida que desplazamos las muestras en el interior de la cavidad. Esta tendencia no se cumple con todas las muestras, a pesar que se encontraban en la misma ubicación y fueron expuestas a radiación partiendo de temperatura ambiente por el mismo periodo de tiempo; esto es debido a que las muestras alrededor de la perforación no presentan similitud en la distribución del material que la componen, teniendo así un perfil totalmente diferente. Ésta prueba permitió verificar que la composición del pavimento es totalmente heterogénea y que varía cuando es radiada por medio de microondas, pero siempre se observó un calentamiento en todos los puntos independientemente de la ubicación dentro de la cavidad y de la composición del pavimento.

8.4.3. PRUEBAS TIPO TRES

Estas pruebas se realizaron sometiendo muestras de pavimento a microondas en repetidas ocasiones y en las mismas condiciones, siempre partiendo de temperatura ambiente y ubicadas en el mismo lugar; la muestra se ubicó en la cavidad del horno como se muestra en la figura 90, con el eje x de la muestra paralelo y en la misma dirección que el eje y de la cavidad y el eje y de la muestra paralelo pero en dirección opuesta al eje x de la cavidad. Las muestras se localizaron a una distancia de 15cm en x .

Figura 90. Ubicación de la muestra para las pruebas tipo tres.



Fuente: Autores.

Las dimensiones y nombres de cada una de las muestras usadas en estas pruebas se muestran en la Tabla 11 así como la distribución de los orificios.

Tabla 11. Geometría y distribución de orificios de las muestras usadas en las pruebas tipo Tres.

Medidas Generales				Orificios							
Muestra	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Uno		Dos		Tres		Cuatro	
				x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
Pavimento 22	32	6.4	5.2	25.7	3	19	3.4	13.2	3.4	6.4	3
Pavimento 23	32	5.9	6	26	3.1	19.4	2.8	13	3.3	7	3.3
Promedio	32.00	6.15	5.60	25.85	3.05	19.20	3.10	13.10	3.35	6.70	3.15

Fuente: Autores.

A continuación se muestran las graficas de los datos obtenidos usando la metodología anteriormente mencionada; la nomenclatura utilizada es:

Pavimento n-# – m: Muestra de pavimento (n) y número de la prueba realizada a esta (#), y distancia con respecto al sistema de referencia de la cavidad (m).

T: Temperatura (°C)

t: Tiempo (s)

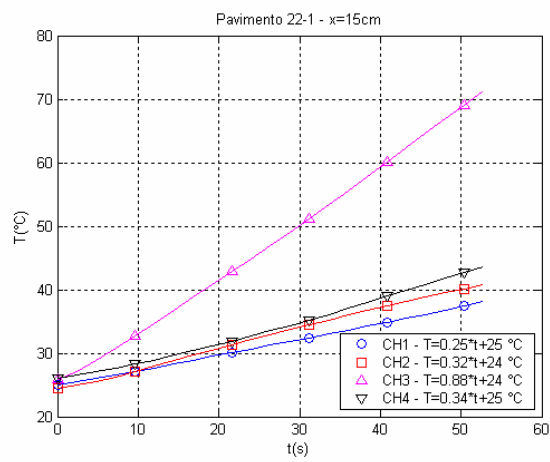
CH1 – T(t): Canal 1 del UMI, correspondiente al orificio 1 de la muestra y regresión lineal de la curva.

CH2 – T(t): Canal 2 del UMI, correspondiente al orificio 2 de la muestra y regresión lineal de la curva.

CH3 – T(t): Canal 3 del UMI, correspondiente al orificio 3 de la muestra y regresión lineal de la curva.

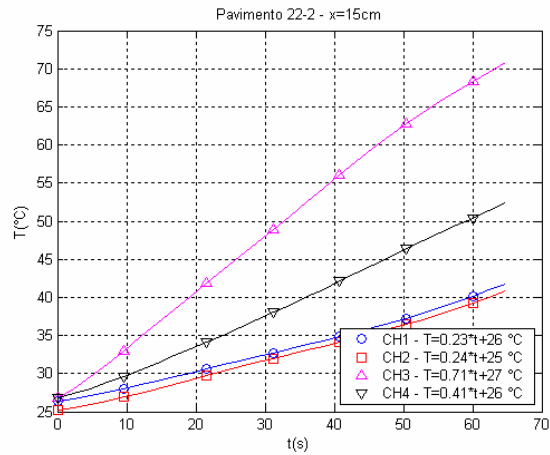
CH4 – T(t): Canal 4 del UMI, correspondiente al orificio 4 de la muestra y regresión lineal de la curva.

Figura 91. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 22 por primera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.



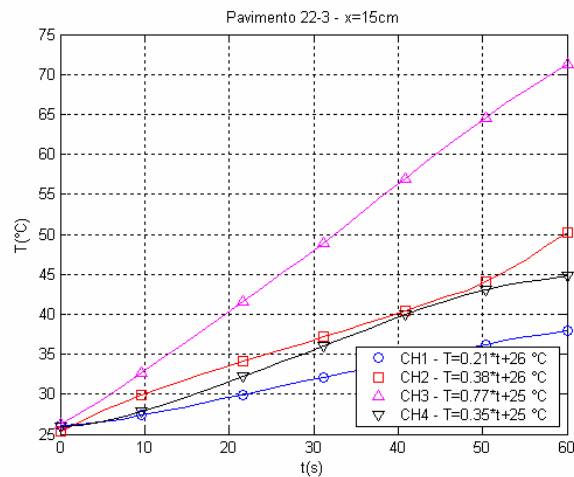
Fuente: Autores

Figura 92. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 22 por segunda vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.



Fuente: Autores

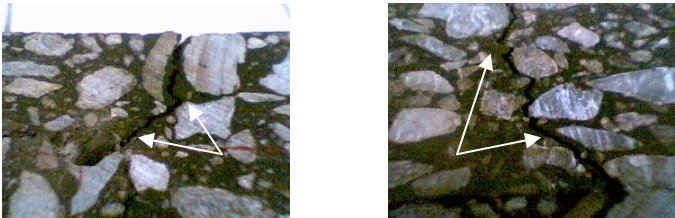
Figura 93. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 22 por tercera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.



Fuente: Autores

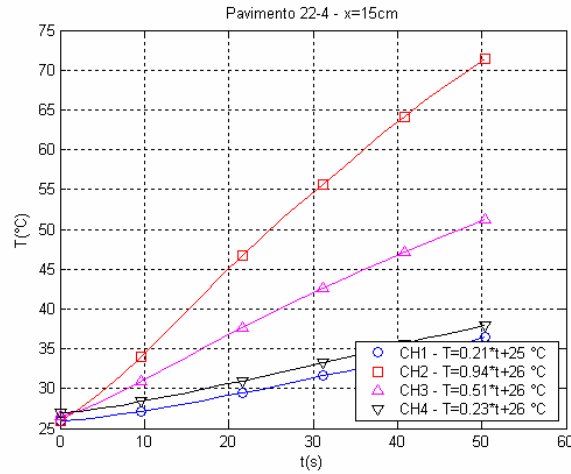
Se presentó la misma tendencia en las tres pruebas anteriores con la muestra pavimento 22 como se puede observar en las figuras 91, 92 y 93, pero esta tendencia cambió debido a que la muestra se agrietó cerca de a la perforación número dos (figura 94), causando así un calentamiento mayor en este punto, tal como se puede apreciar a partir de la figura 95.

Figura 94. Grietas que causan un mayor calentamiento cerca de la perforación.



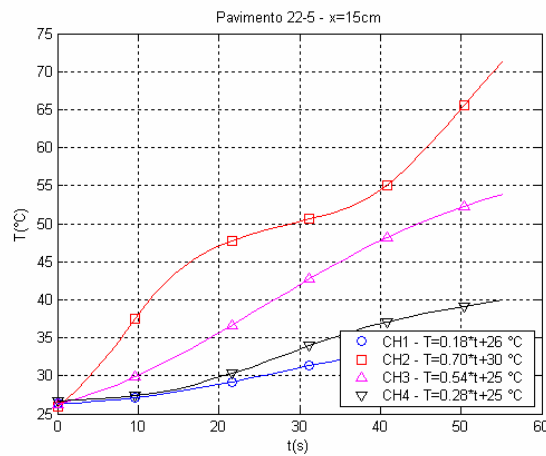
Fuente: Autores.

Figura 95. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 22 por cuarta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.



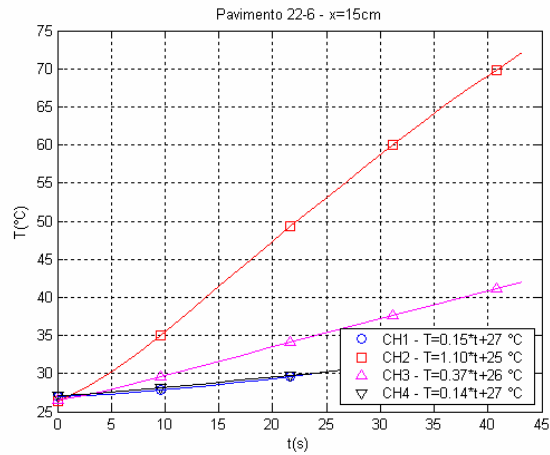
Fuente: Autores

Figura 96. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 22 por quinta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.



Fuente: Autores

Figura 97. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 22 por sexta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, ubicada a una distancia de 15cm en el eje x de la cavidad.

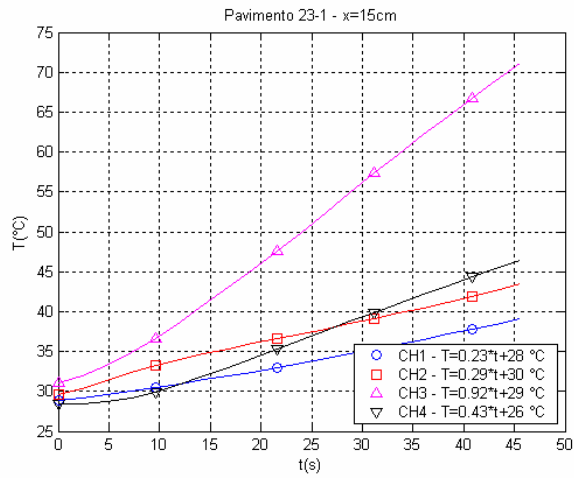


Fuente: Autores

Aun cuando el perfil de temperatura cambió después que la muestra se agrietó cerca de la perforación número dos, se puede apreciar una nueva tendencia en el perfil de temperatura de las pruebas en las figuras 95, 96 y 97.

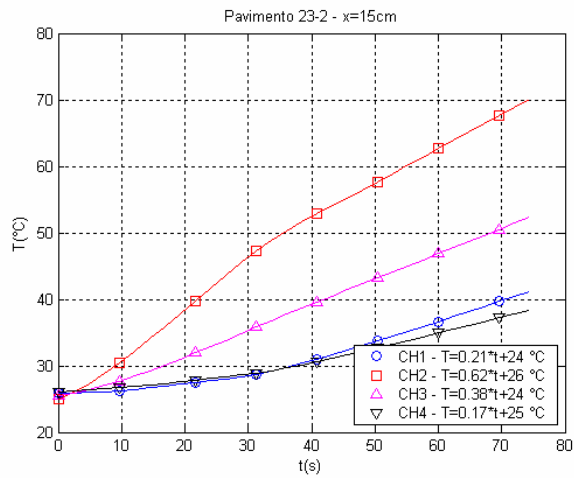
A continuación se muestran las gráficas de las pruebas realizadas a la muestra pavimento 98, la cual no presenta ninguna grieta visible.

Figura 98. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 23 por primera vez a calentamiento inducido por medio de microondas.



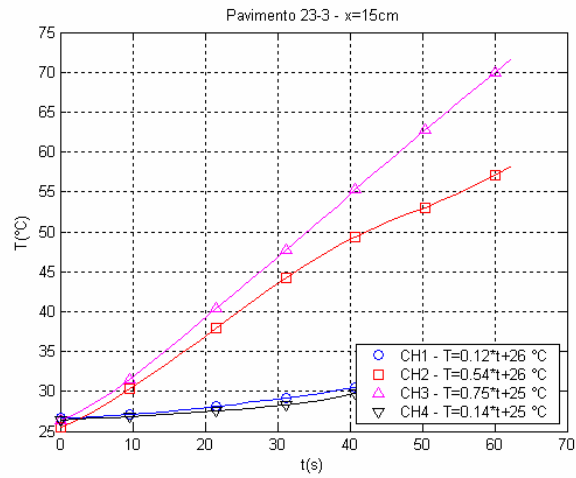
Fuente: Autores

Figura 99. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 23 por segunda vez a calentamiento inducido por medio de microondas.



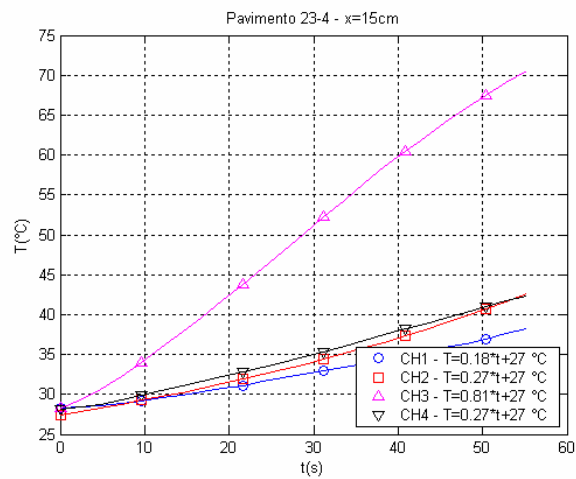
Fuente: Autores

Figura 100. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 23 por tercera vez a calentamiento inducido por medio de microondas.



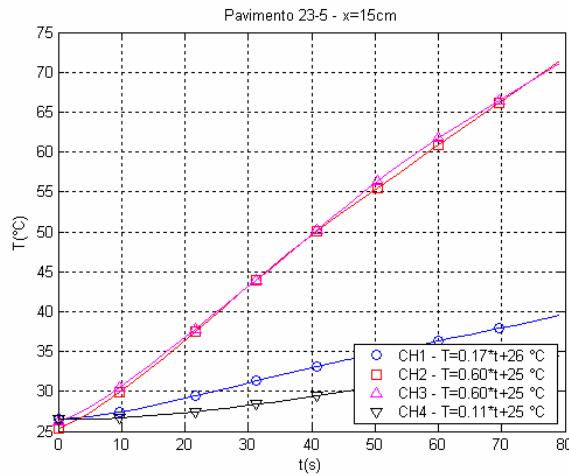
Fuente: Autores

Figura 101. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 23 por cuarta vez a calentamiento inducido por medio de microondas.



Fuente: Autores

Figura 102. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra *pavimento* 23 por quinta vez a calentamiento inducido por medio de microondas.



Fuente: Autores

La temperatura registrada en el canal dos de la muestra Pavimento 23 varía apreciablemente de una prueba a otra, debido a que la perforación en donde es introducido el capilar de vidrio quedó con un diámetro mucho mayor que el diámetro del capilar (Figura 103), ocasionando así que entre una prueba y otra se ubique en una posición diferente, y por tanto tome datos distintos. Sin embargo, se puede afirmar que la temperatura medida debe ser menor que la temperatura real de la muestra.

Figura 103. Perforación con diámetro mucho mayor al del capilar que causa errores en la medida.



Fuente: Autores.

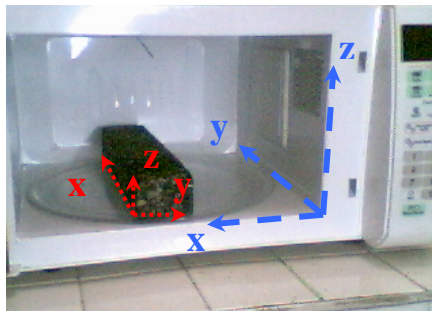
Se puede observar una tendencia similar en las gráficas T vs t entre pruebas que se realicen a una misma muestra y mantengan las mismas condiciones, entre estas, la posición, la temperatura inicial y el tiempo de exposición a microondas. Esta tendencia se puede ver afectada por grietas causadas por las altas temperaturas o al manipular las muestras después de cada prueba, ya que ésta se encuentra blanda siendo así susceptible a deformaciones.

Se pueden presentar errores de medida en las perforaciones si el capilar de vidrio que se introduce allí no queda fijo y lo mas ajustado posible a la perforación, debido a que el espacio que queda entre el capilar y la perforación estará ampliamente afectado por la temperatura que esté presente en la cavidad, mas no por la temperatura que se encuentre presente en la muestra.

8.4.4. PRUEBAS TIPO CUATRO

Estas pruebas se realizaron manteniendo las mismas condiciones entre prueba y prueba pero partiendo de una temperatura inicial diferente a la ambiente; la muestra se ubicó en la cavidad del horno como se muestra en la figura 104, con el eje x de la muestra paralelo y en la misma dirección que el eje y de la cavidad y el eje y de la muestra paralelo pero en dirección opuesta al eje x de la cavidad. La muestra fue ubicada a una distancia de 15cm en x .

Figura 104. Ubicación de la muestra para las pruebas tipo cuatro.



Fuente: Autores

Las dimensiones y nombre de la muestra usada en estas pruebas se muestran en la Tabla 12 así como la distribución de los orificios.

Tabla 12. Geometría y distribución de orificios de la muestra usada en las pruebas tipo cuatro.

Medidas Generales				Orificios							
Muestra	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Uno		Dos		Tres		Cuatro	
				x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
Pavimento 24	32.00	6.40	5.10	26.40	3.30	19.30	3.00	12.60	3.10	6.50	3.10

Fuente: Autores.

A continuación se muestran las gráficas de los datos obtenidos usando la metodología anteriormente mencionada; la nomenclatura utilizada es:

Pavimento n-# – m: Muestra de pavimento (n) y número de la prueba realizada a esta (#), y distancia con respecto al sistema de referencia de la cavidad (m).

T: Temperatura (°C)

t: Tiempo (s)

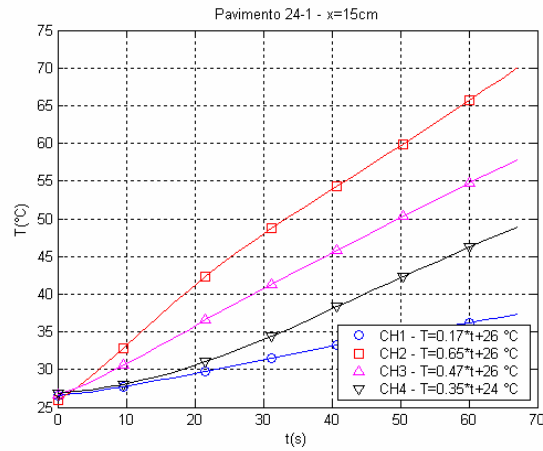
CH1 – T(t): Canal 1 del UMI, correspondiente al orificio 1 de la muestra y regresión lineal de la curva.

CH2 – T(t): Canal 2 del UMI, correspondiente al orificio 2 de la muestra y regresión lineal de la curva.

CH3 – T(t): Canal 3 del UMI, correspondiente al orificio 3 de la muestra y regresión lineal de la curva.

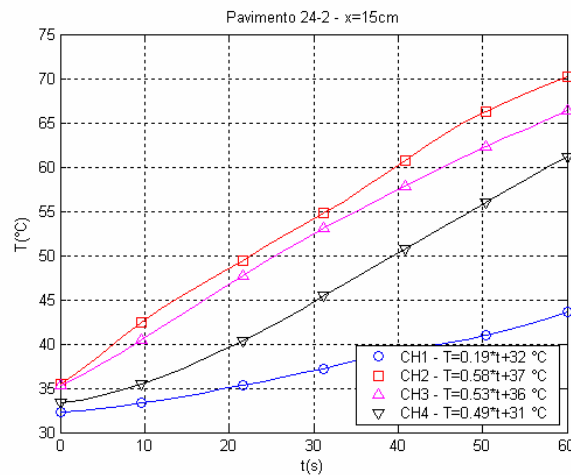
CH4 – T(t): Canal 4 del UMI, correspondiente al orificio 4 de la muestra y regresión lineal de la curva.

Figura 105. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento 24 por primera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 26.53°C.



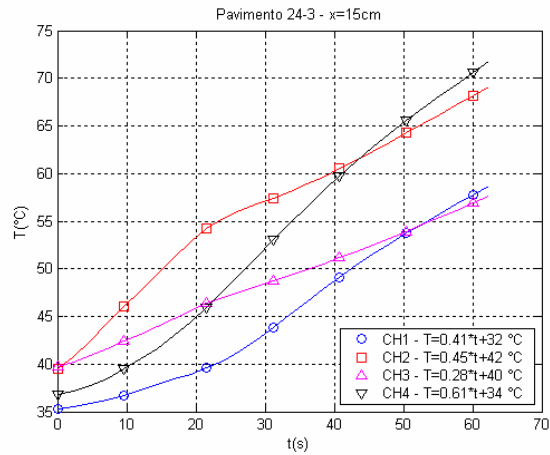
Fuente: Autores

Figura 106. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento 24 por segunda vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 31.40°C.



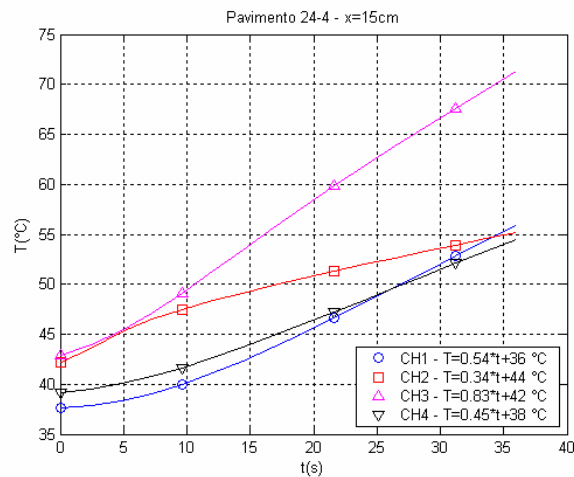
Fuente: Autores

Figura 107. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento 24 por tercera vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 37.82°C.



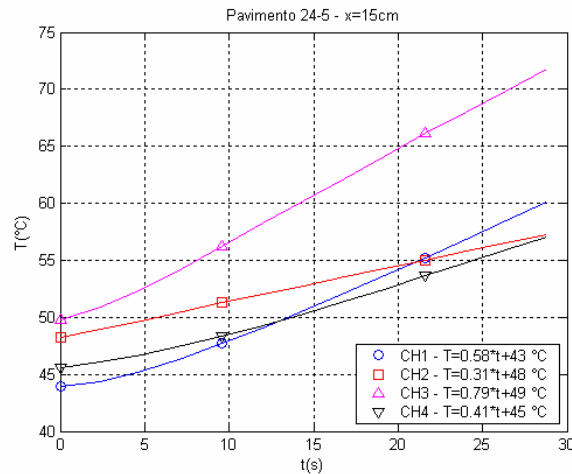
Fuente: Autores

Figura 108. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento 24 por cuarta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 40.4°C.



Fuente: Autores

Figura 109. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento 24 por quinta vez a calentamiento inducido por medio de microondas, partiendo de una temperatura promedio entre canales de 46.8°C.



Fuente: Autores

8.4.5. ANÁLISIS

Se puede observar que no existe una tendencia fija del comportamiento de la temperatura en la muestra, ya que algunas veces el canal dos del UMI alcanzaba mayores temperaturas en comparación con la de los demás canales (figuras 105 a 109), pero en otras pruebas la región más caliente era la que estaba cercana al canal 3 del UMI. No obstante, podemos concluir que la región comprendida entre estos dos canales, corresponde a las partes de mayor calentamiento dentro de la muestra de pavimento en esa posición. Además se puede observar que existe un efecto sobre el perfil de temperatura y la velocidad de calentamiento en cada uno de los puntos

donde se midió, causado por la temperatura inicial de la muestra. Esto puede inducir a pensar inicialmente que las propiedades térmicas y/o eléctricas (constante dieléctrica) son función de la temperatura.

Como conclusión de estas pruebas se puede mencionar que existe marcada interacción entre el pavimento y las microondas en el rango de las microondas; las temperaturas alcanzadas están en el orden de los cientos de grados centígrados dependiendo del tiempo de exposición. Las velocidades de calentamiento y las temperaturas alcanzadas en determinadas posiciones dentro de la muestra dependen de su ubicación relativa dentro de la cavidad y existen puntos calientes donde incluso se observó inicio de combustión. Todo ello nos lleva a la conclusión que el pavimento utilizado (asfalto más agregado) puede calentarse en tiempos y consumos de energía razonables, al someterlos a calentamiento dentro de una cavidad resonante cerrada. De igual manera se pudo observar que el calentamiento y la velocidad de este son dependientes de la temperatura inicial de la muestra.

8.4.6. PRUEBA TIPO CINCO

La diferencia de estas pruebas con las anteriormente realizadas y cuyos resultados ya fueron presentados, es que se duplicó el número de magnetrones o fuentes de radiación. La cavidad utilizada fue la de un horno Panasonic de la serie The Genius micro/Quartz Browner, a la cual se le acondicionaron dos magnetrones de tal manera

que en su interior estará presente radiación proveniente de dichos magnetrones. La cavidad con la adecuación de los magnetrones se presenta en la figura 110. Es de aclarar que los magnetrones utilizados fueron los de los hornos usados para las pruebas anteriores.

Figura 110. Cavidad resonante con dos magnetrones. Magnetron 1: Ubicado en la guía de onda propia de la cavidad. Magnetron 2: Magnetron en la guía de onda adicional adaptada a la cavidad.

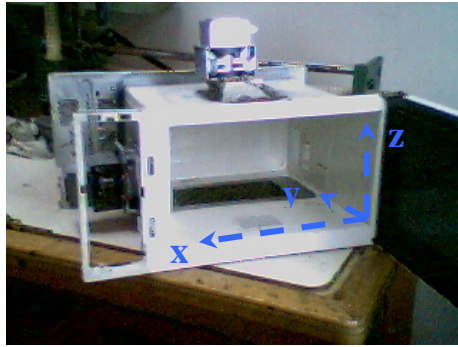


Fuente: Autores

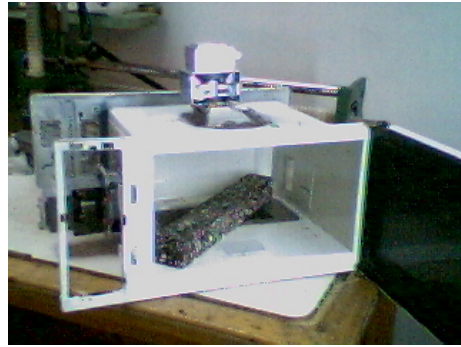
El circuito de alimentación para cada magnetron fue montado con transformador, diodo y condensador independiente, los cuales fueron extraídos de hornos como el descrito en la Tabla 8.

Las dimensiones de la cavidad y como fue ubicada la muestra en su interior se muestra en la figura 111.

Figura 111. a) Cavidad utilizada en las pruebas tipo cinco, b) Ubicación de la muestra en el interior de la cavidad. Dimensiones de la cavidad: $X = 37.5\text{cm}$, $Y = 36.5\text{cm}$, $Z = 21\text{cm}$.



a)



b)

Fuente: Autores

La prueba se realizó en primera medida utilizando un solo magnetrón es decir solo uno de ellos estaba activo (Magnetron 1). Luego se radió la muestra con los dos magnetrones encendidos.

Los puntos donde se tomaron las medidas de temperatura fueron ubicados de tal forma que se pudiera realizar un mapeo significativo del comportamiento térmico de la muestra. En cuanto a la ubicación de los sensores de fibra óptica fue arbitraria en

primera instancia pero pasada la primera prueba se estableció el orden de los sensores ubicándolos en la misma posición durante el desarrollo de todas las pruebas.

En la figura 112 se muestra el orden y la ubicación de los sensores en la muestra.

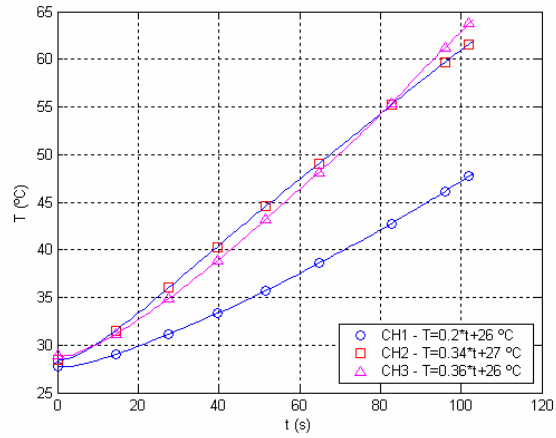
Figura 112. Orden y ubicación de los sensores en la muestra.



Fuente: Autores

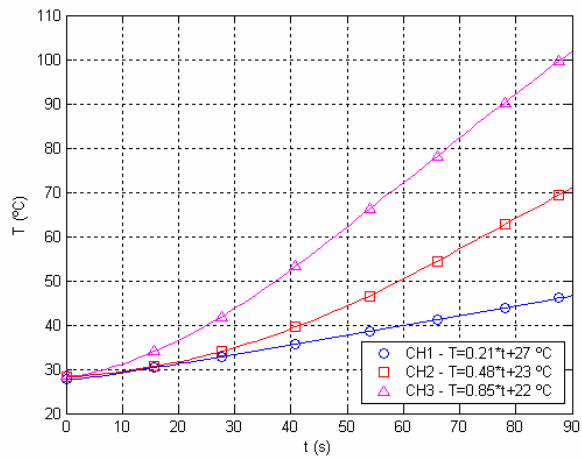
En las figuras 113 y 114 se presentan los resultados obtenidos de la realización de estas pruebas.

Figura 113. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento a calentamiento inducido por medio de microonda con un solo magnetron encendido.



Fuente: Autores

Figura 114. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra pavimento a calentamiento inducido por medio de microonda con dos magnetrones encendidos.



Fuente: Autores

Como se observa en la figura 113 y 114 cuando la muestra es radiada con dos magnetrones el calentamiento se acelera encontrándose una diferencia de más de 30°C en el punto mas caliente de la muestra. Al comparar los resultados obtenidos de las pruebas con uno y dos magnetrones, se observa que todos los puntos de la muestra de pavimento alcanzan una temperatura superior en un mismo periodo de exposición, al ser radiada con dos magnetrones encendidos simultáneamente.

9. COMPORTAMIENTO TERMICO DE UNA MUESTRA DE ASFALTO AL SOMETERLA A RADIACION DE MICROONDAS SIENDO ESTA UNA CARA DE LA CAVIDAD

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al utilizar una muestra de asfalto cuyo tamaño es lo suficientemente grande como para remplazar con ésta una de las caras de la cavidad. También se muestra el cambio en el perfil de temperaturas al usar dos magnetrones en lugar de uno como fuente de radiación.

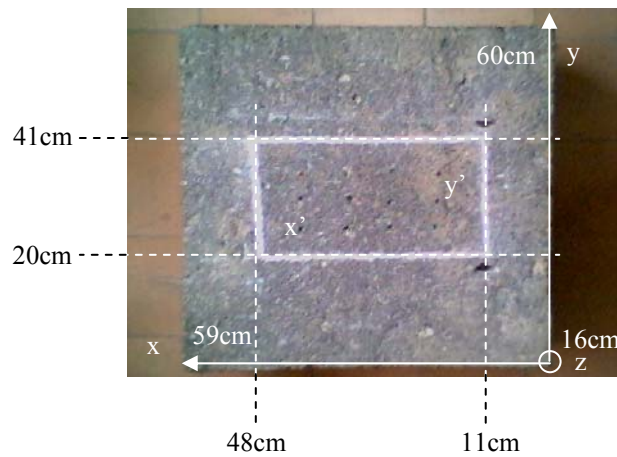
Con estas pruebas se pretende acercarse lo suficiente al caso real de un prototipo que utilice microondas para realizar operaciones de reparcho de pavimentos y que opere en campo.

9.1. ASPECTOS GENERALES

La cavidad y magnetrones utilizados en estas pruebas fueron los mismos que se describieron en la sección anterior para las pruebas tipo cinco (figura 110 y 111). La diferencia entre estas pruebas y las anteriores radica en que en este caso la muestra remplazará una de las caras de la cavidad. Por comodidad la cara reemplazada es la correspondiente a la puerta, ya que ésta se puede remover fácilmente.

La muestra utilizada con sus respectivas dimensiones se muestra en la figura 115, el rectángulo blanco es la región que se utilizó como pared de la cavidad, siendo éste el lugar donde las microondas actuaron produciendo calentamiento.

Figura 115. Muestra utilizada como cara de la cavidad y ubicación del área sometida a radiación (Vista superior).



Fuente: Autores

Para tomar los datos de temperatura en la muestra se realizaron perforaciones con un diámetro de 0.5cm y una profundidad de 8.5cm, esto con el fin de adquirir las temperaturas que se generan a una profundidad media de la muestra; en el interior de cada perforación se puso un capilar de vidrio con una longitud de 14cm y diámetros interno y externo de 0.3cm y 0.4cm respectivamente, estos capilares fueron sellados por el extremo que se encuentra dentro de la muestra utilizando silicona roja, la cual es resistente a las altas temperaturas (figura 116), para evitar el posible contacto con

sustancias corrosivas o adherentes que pueden alterar la operación o poner en peligro la integridad de los sensores.

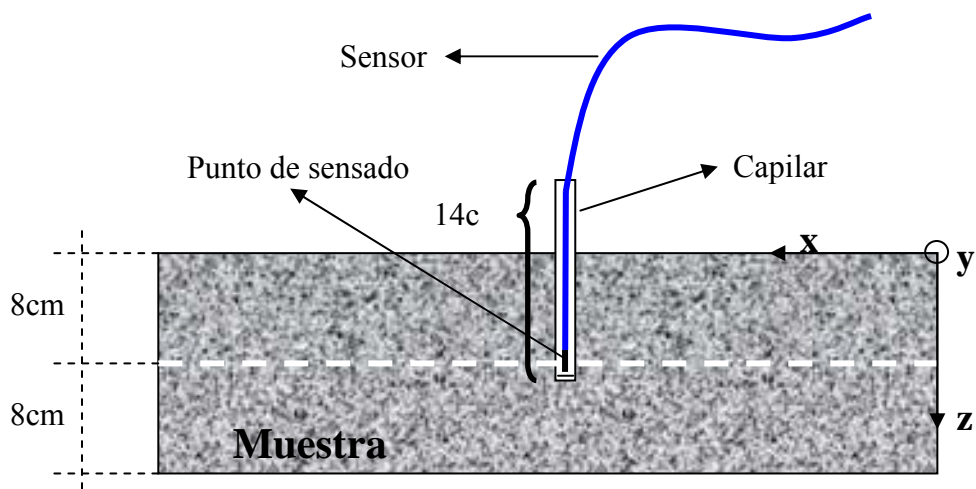
Figura 116. Capilares utilizados para proteger los sensores.



Fuente: Autores

La parte sensible de los sensores quedo ubicada en el interior de la muestra a una profundidad aproximada de 8cm, siendo ésta el punto medio de la profundidad de la muestra, como se puede ver en la figura 117.

Figura 117. Ubicación de los sensores en el interior de la muestra.



Fuente: Autores

9.2. TIPOS Y DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

9.2.1. TIPOS DE PRUEBAS

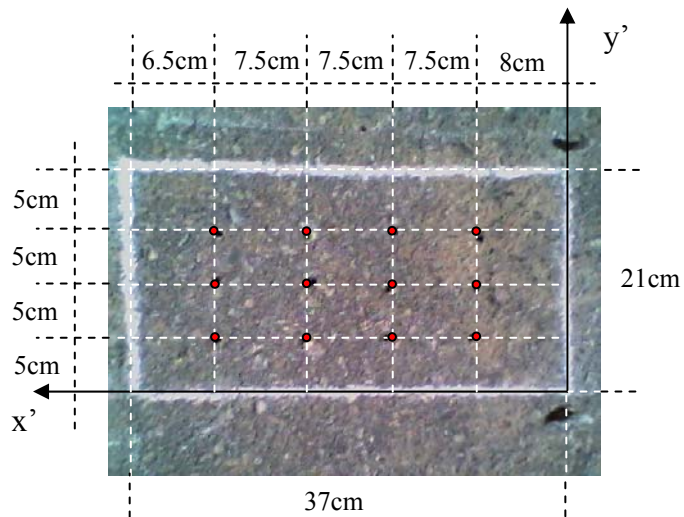
Para observar los perfiles de temperatura del pavimento cuando este hace parte de la cavidad resonante, se plantean tres tipos de pruebas:

- **Prueba tipo uno:** Muestra de pavimento sobre el piso, radiándola con un solo magnetron encendido.
- **Prueba tipo dos:** Muestra de pavimento sobre el piso y radiándola con dos magnetrones encendidos simultáneamente.
- **Prueba tipo tres:** Muestra de pavimento sobre una superficie metálica, apantallada por los lados, radiándola con dos magnetrones encendidos simultáneamente.

9.2.2. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

1. En primera instancia se perforó la muestra de pavimento a utilizar en las tres pruebas; las perforaciones fueron distribuidas sobre la superficie según se muestra en la figura 118.

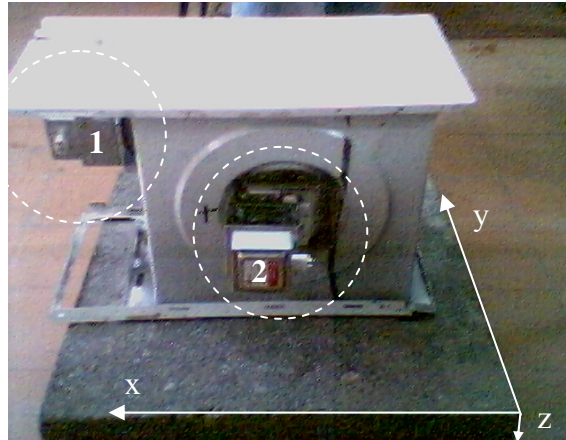
Figura 118. Ubicación de las perforaciones en donde se realizaron las medidas de temperatura.



Fuente: Autores

2. La cavidad fue posicionada como se muestra en la figura 119, en esta observa el magnetrón adicional que fue adaptado a la cavidad; esta adaptación fue realizada por un tecnólogo Electromecánico

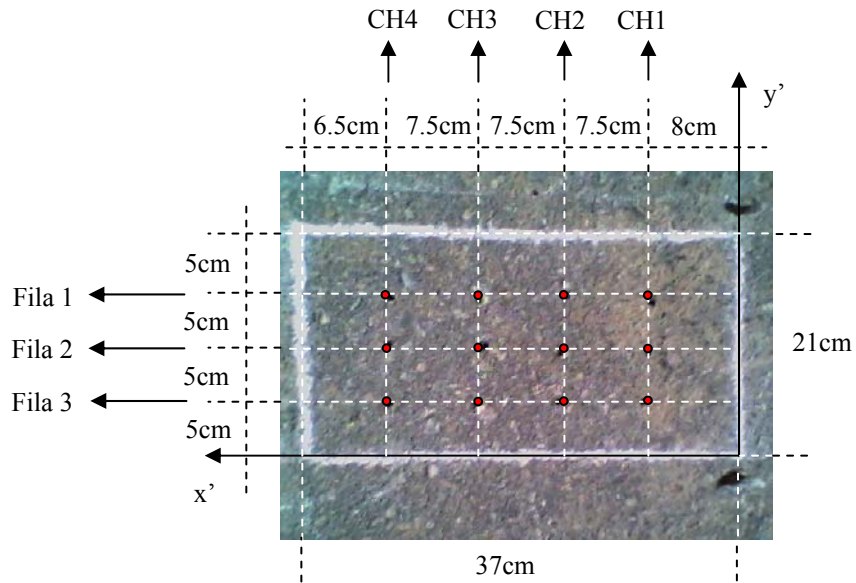
Figura 119. Posición de la cavidad sobre la muestra. 1) magnetrón en la guía de onda propia de la cavidad. 2) magnetrón en la guía de onda adicional adaptada a la cavidad.



Fuente: Autores

3. Como el UMI cuenta con cuatro canales para realizar mediciones, se hicieron las pruebas para cierto conjunto de puntos utilizando uno y dos magnetrones. Los puntos fueron agrupados por filas y la distribución de los canales fue realizada como se muestra en la figura 120.

Figura 120. Agrupación de puntos por filas para los cuales se realizaron pruebas, y distribución de los canales en cada una de las filas.



Fuente: Autores

4. Para las pruebas tipo uno y tipo dos se iniciaron con una temperatura promedio de 30.4°C en la muestra la cual fue la registrada a temperatura ambiente; para la prueba tipo tres la temperatura promedio registrada fue de 28.8°C . El periodo de exposición para las tres pruebas fue de 1 hora (3600 segundos). Después de llevarse a cabo una prueba sobre la muestra esta tarda para regresar a temperatura ambiente aproximadamente 12 horas por convección libre.

5. . La nomenclatura utilizada en las gráfica es la siguiente:

Titulo: Fila en la que se realizo la toma de datos y numero de magnetrones utilizados.

T : Temperatura (°C)

t : Tiempo (s)

CH1 – T(t): Canal 1 del UMI y regresión lineal de la curva.

CH2 – T(t): Canal 2 del UMI y regresión lineal de la curva.

CH3 – T(t): Canal 3 del UMI y regresión lineal de la curva.

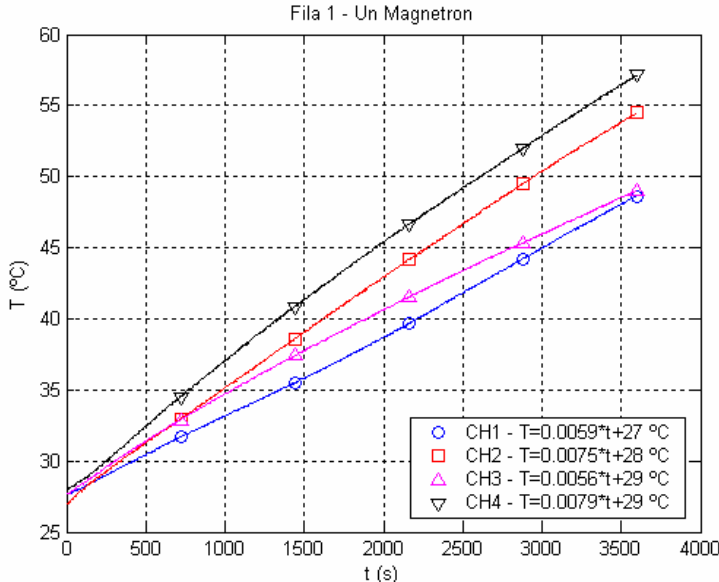
CH4 – T(t): Canal 4 del UMI y regresión lineal de la curva.

9.2.3. RESULTADO DE LAS PRUEBAS

9.2.3.1. Resultado Prueba Tipo Uno

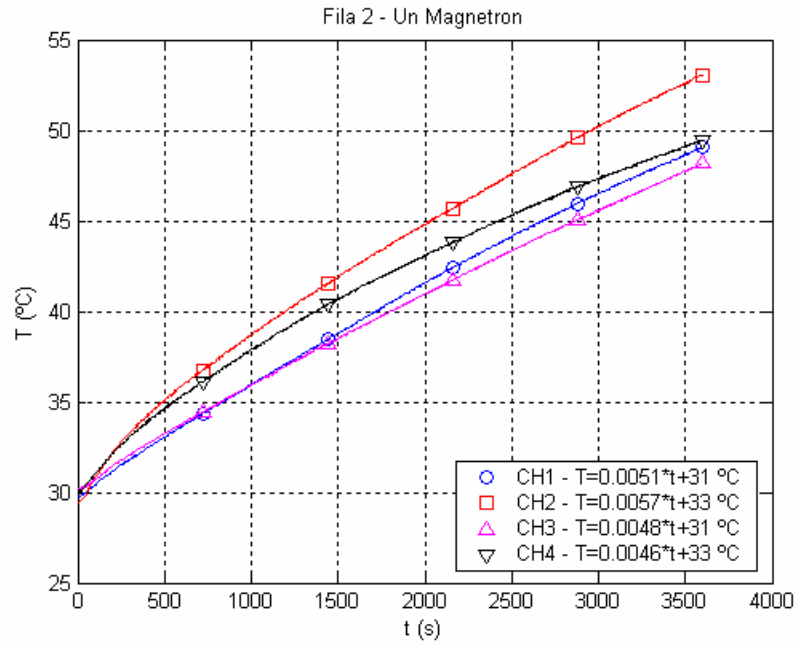
El montaje utilizado es el mostrado en la figura 119. El magnetrón utilizado en esta prueba es el que se encuentra ubicado en la guía de onda propia de la cavidad. A continuación se presentan los resultados de estas pruebas.

Figura 121. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 1, utilizando el magnetron ubicado en la guía de onda propia de la cavidad.



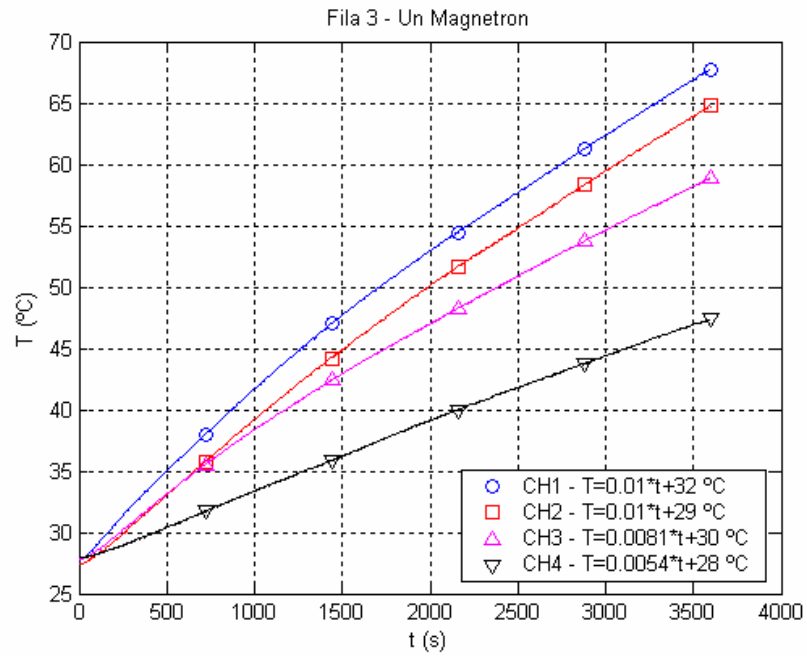
Fuente: Autores

Figura 122. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 2, utilizando el magnetrón ubicado en la guía de onda propia de la cavidad.



Fuente: Autores

Figura 123. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 3, utilizando el magnetrón ubicado en la guía de onda propia de la cavidad.

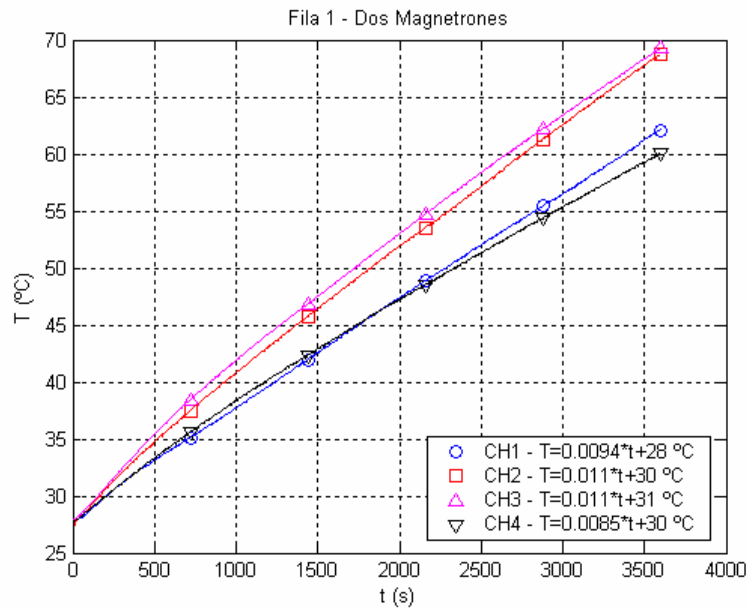


Fuente: Autores

9.2.3.2. Resultado Prueba Tipo Dos

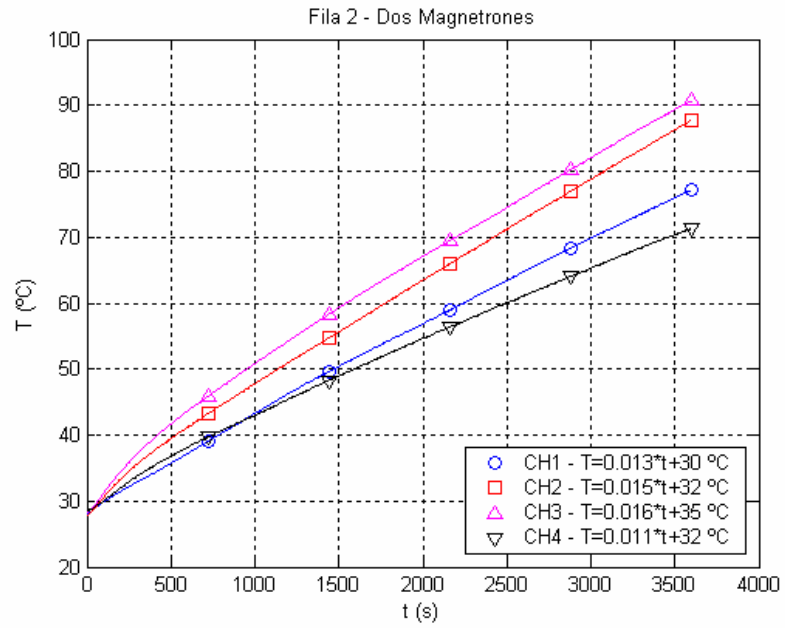
En esta prueba el montaje utilizado es igual al de la prueba uno; en cuanto a los magnetrones los dos se activan en forma simultanea. A continuación se presentan los resultados obtenidos de estas pruebas.

Figura 124. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 1, utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.



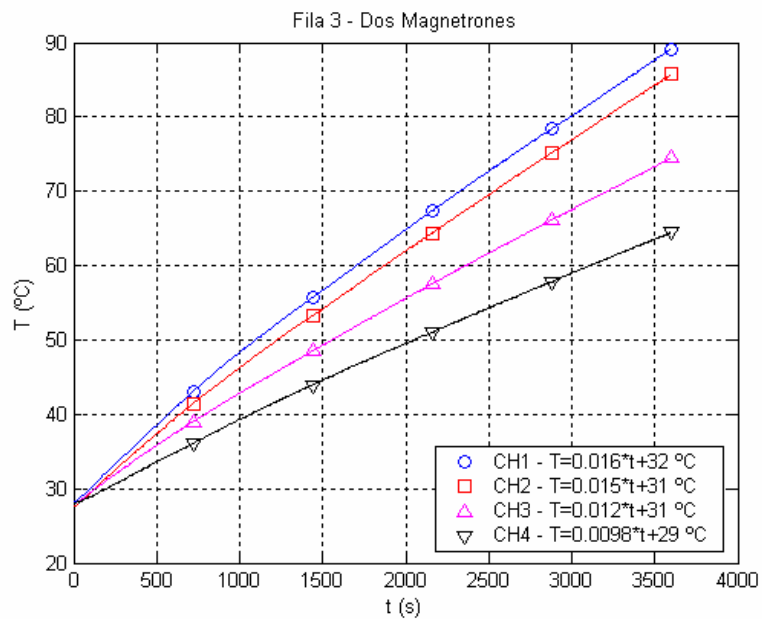
Fuente: Autores

Figura 125. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 2, utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.



Fuente: Autores

Figura 126. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas tomando datos en la fila 3, utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.



Fuente: Autores

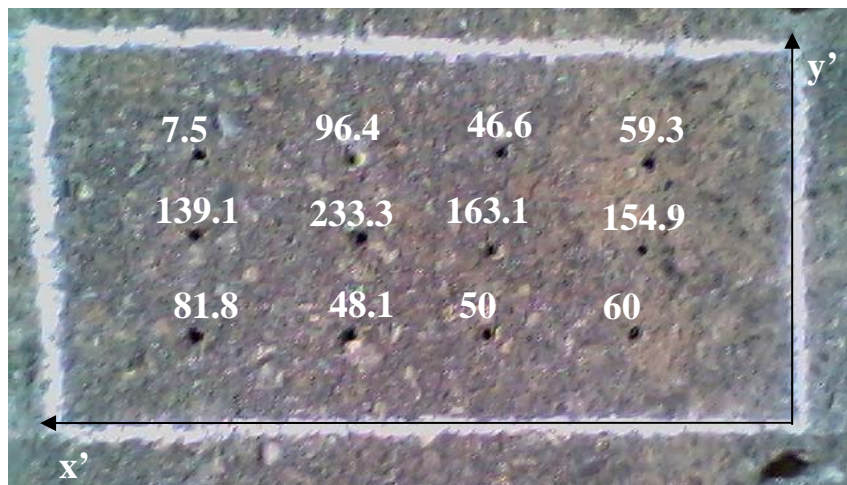
9.2.3.3. Análisis

De los resultados mostrados de las pruebas tipo uno y tipo dos, se puede observar un incremento en la velocidad de calentamiento de la muestra al aumentar el número de magnetrones que generan microondas en el interior de la cavidad; mejorando los resultados obtenidos de las pruebas con un solo magnetrón, logrando un incremento hasta en un 233.3% en el punto mas caliente, pasando de una temperatura máxima

alcanzada por un solo magnetrón en el transcurso de una hora de 48.1 °C a una de 90.7 °C utilizando dos magnetrones.

En la figura 127, se puede observar en que porcentajes se incrementaron las velocidades de calentamiento en cada uno de los puntos al utilizar dos magnetrones.

Figura 127. Porcentajes en que se incremento la velocidad de calentamiento en cada uno de los puntos de medida al utilizar dos magnetrones.



Fuente: Autores

9.2.3.4. Resultado Prueba Tipo Tres

De las dos primeras pruebas se obtuvo que el mayor calentamiento presentado en la muestra de pavimento esta en la segunda fila; es por esta razón que el sensado de temperatura en la primera prueba de este tipo se realizara en esta fila.

El montaje utilizado para esta prueba consta de tres partes: la lamina metálica de dimensiones de 42cm*42cm sobre la cual va a descansar la muestra, la muestra de pavimento y la cavidad, y por ultimo el pantallamiento con laminas de zinc realizado al montaje (figura 128).

Figura 128. Montaje empleado para la realización de la prueba tipo tres, a) Lamina reflectora, b) Laminas para el apantallamiento, c) montaje sin apantallamiento, d) montaje con apantallamiento.



a)



b)



c)

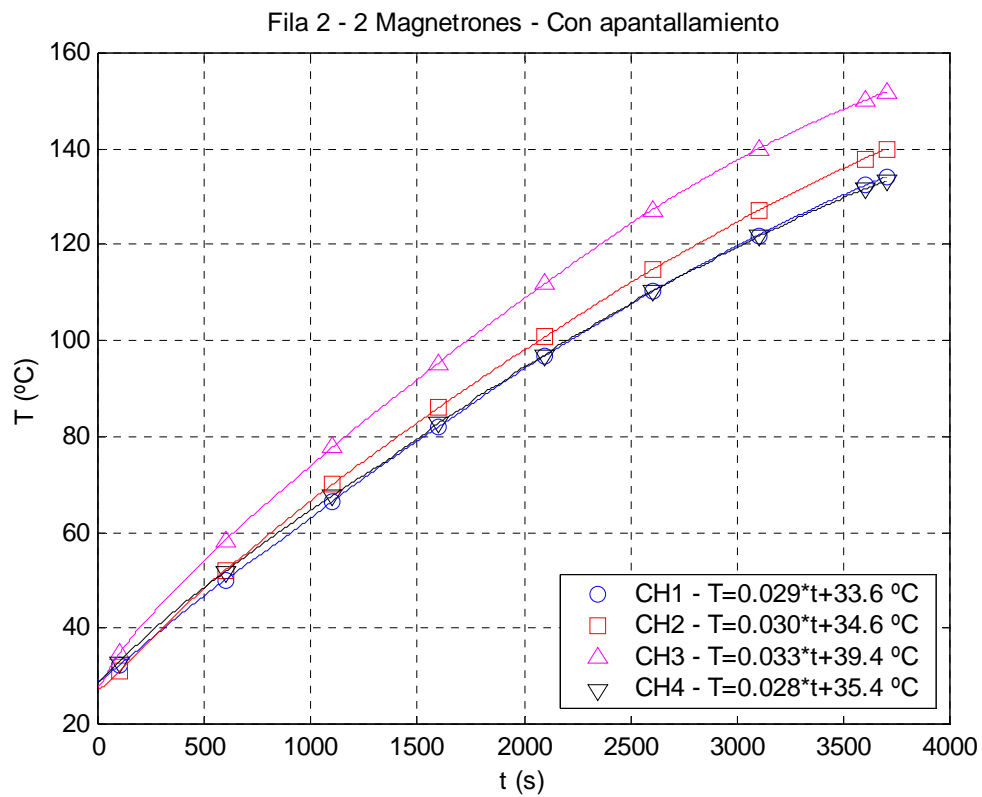


d)

Fuente: Autores

A continuación se presenta los resultados de esta prueba.(Figura 129).

Figura 129. Temperaturas registradas en cada canal al someter la muestra a calentamiento inducido por medio de microondas y apantallando, tomando datos en la fila 2 y utilizando los dos magnetrones ubicados en la cavidad.



9.2.3.5. Análisis

De la figura 129 se puede observar que el pavimento alcanza una temperatura máxima de 150 °C en el punto más caliente, es decir con respecto a la prueba tipo dos se aumentó el calentamiento en 60 °C; esto es debido al mejor aprovechamiento de las microondas, dado que la muestra descansa sobre una superficie metálica la cual reflejara la microondas; y el apantallamiento no permitió que se dispersaran sin ninguna dirección.

La muestra de pavimento al alcanzar los 150 °C presentó grietas (figura 130), también estaba tan blanda que se podía remover pavimento solamente utilizando las manos.

Figura 130. Grietas presentadas en la muestra de pavimento después de ser radiada y alcanzar una temperatura 150 °C.



Debido a que la muestra quedo agrietada no se realizaron mas pruebas de este tipo ya que no se cuentan con mas muestras de este tipo.

10. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Después de realizar una gran cantidad de pruebas a puerta cerrada, se pudo corroborar la alta interacción térmica que existe entre las microondas y el pavimento, a tal punto que en un tiempo no mayor de 5 minutos el pavimento puede ser destruido con facilidad. Así mismo estas pruebas de laboratorio permiten afirmar que el pavimento tiene una baja repetibilidad de los perfiles de temperatura, creyéndose que esta característica es debida a la anisotropía del pavimento.
- La interacción térmica microondas-Pavimento también se presenta cuando el pavimento es una de las caras de la cavidad; esta interacción es más lenta que la presentada dentro de la cavidad, pero los resultados obtenidos son técnicamente aceptables y da confianza para aplicar esta técnica en un proceso de reparcho de vías.

- El aumento del número de fuentes de radiación (2-magnetrones), ubicados en una cavidad resonante y que sus proyecciones formen un ángulo de 90°; permitió disminuir el tiempo de calentamiento para una muestra de pavimento (X=43 cm, Y=6 cm, Z=5cm) en las prueba a puerta cerrada, obteniéndose un incremento en la temperatura dentro de la muestra de pavimento del orden de los treinta grados centígrados (30°C) en algunos puntos.
- Cuando el pavimento hace parte de la cara de la cavidad, y se duplica el número de magnetrones; se disminuye el tiempo de calentamiento del pavimento observándose un incremento de hasta el 200% en el punto mas caliente de la muestra; además, no se observó ninguna influencia de la radiación sobre los magnetrones cuando los dos están activos simultáneamente.
- La profundidad de penetración de las microondas en el pavimento es superior a 16 cm; también se observó que las microondas son reflejadas si la superficie sobre la cual descansa la muestra es metálica; y al realizar un apantallamiento se observaron incrementos de temperatura por esta razón hasta de 50°C, en el mismo tiempo de exposición y en el punto mas caliente.

- Para la obtención de los perfiles de temperatura se utilizaron transductores de fibra óptica; se desarrolló un algoritmo que permite la comunicación entre un PC y el acondicionador de señal UMI; este algoritmo presenta todas las características de control de equipo. Además la programación realizada queda con la característica para controlar el UMI con cualquier tipo de sensor apto para el acondicionador.
- El monitoreo para trabajar con radiación de microondas con frecuencia de 2.45 GHz, estuvo brindado por el desarrollo del sistema de detección de fugas para microondas de 2.45 GHz; este se calibró cumpliendo con las normas internacionales de seguridad en humanos, para el trabajo con radiación no ionizante.
- Los diodos con recubrimiento de cristal tienen respuesta a la acción de microondas, algunos presentan tensiones inducidas más altas que otros; es decisión de cada diseñador hacer la elección del diodo a emplear en una determinada aplicación.
- El sistema (hardware y software) de sensado de temperatura por medio de termocupla tiene un desempeño óptimo frente al equipo patrón, presentando un error menor de 4°C para la medición de temperatura cuando se utilizan medios de calentamiento que no involucran microondas; en cuanto al

desempeño de este sistema, si es empleada radiación electromagnética presenta un error de $\pm 4^{\circ}\text{C}$, cuando se ha estabilizado la medida; un error aceptable en el proceso de calentamiento de pavimento. Este error es debido al acondicionador o linealizador, dado que este elemento introduce un error de 1°C a 3°C al realizar el acondicionamiento.

- La programación de los algoritmos desarrollados en el presente trabajo de grado se hizo de la forma mas amigable posible, para facilitar su entendimiento y realizársele cambios en un futuro.
- El sistema de medición utilizando termocupla presenta un pico de temperatura cuando se encuentra sensando dentro de una cavidad resonante, se cree que este comportamiento de calentamiento debido a las microondas es inherente a la termocupla. Se diseño software y se presentó una alternativa para mejorar la visualización de la lectura realizada por el sistema de sensado por medio de termocupla, no mostrando al usuario las temperaturas iniciales que se observan al inicio del ciclo de sensado; esta estrategia planteada puede ser implementada en el equipo prototipo de reparcho de vías.

RECOMENDACIONES

- De los resultados experimentales obtenidos de la técnica “Calentamiento de pavimento con microondas”, se recomienda realizar un estudio de viabilidad para implantar una malla metálica ó fragmentos de metal en las vías, que refleje las microondas; de este estudio se podría tener disminución del tiempo de calentamiento y por lo tanto eficiencia y ahorro energético. Haciendo que esta nueva tecnología para el proceso de reparcho de vías sea sostenibles ecológica y económicamente en el país.
- El tiempo de radiación para llevar el pavimento a una temperatura de 120°C es alto; se recomienda utilizar magnetrones que estén diseñados para operar durante largos tiempos, ya que los utilizados (magnetrones de hornos convencionales) presentaban alto calentamiento, lo cual puede afectar la vida útil de este elemento.

- Le elección del diodo para implementar un detector de fugas debe presentar tiempos de respuesta bajos, altas tensiones inducidas ante las presencia de microondas. En cuanto a la calibración de los detectores de fugas se recomienda hacerla en el momento de una nueva implementación, o cuando se va a cambiar de aplicación; así se utilicen siempre el mismo fotodetector y demás elementos que componen su hardware.
- El proyecto contó con un medidor de campo eléctrico, se recomienda desarrollar un sistema de sensado de campo eléctrico que permita cuantificar los niveles de exposición y que posea una escala más alta que el ya existente; la implementación de un sistema de este tipo seria ampliamente utilizado en el estudio de nuevas tecnologías que utilicen microondas.
- Realizar el modelado del efecto de calentamiento producido en la termocupla cuando se está sensando temperatura en pavimento, para hacer este sistema mas eficiente; dado que se podría disminuir el tiempo para tomar la medida de temperatura, o en su defecto se podría llegar a predecir; también podría ayudar al estudio de las variaciones del campo electromagnético dentro de la cavidad.

- Para disminuir el error en el sensado de temperatura, se recomienda cambiar el acondicionador de la termocupla; o cambiar la estrategia de sensado; es decir, que la termocupla solo este dentro del pavimento en el momento de realizar el sensado.
- Para reducir el tiempo de calentamiento del pavimento cuando este hace parte de la cavidad, se recomienda aumentar el número fuentes de radiación (magnetrones); además variar en diferentes posiciones los magnetrones, para así poder determinar cual es la ubicación que mas calentamiento puede brindar.

11. BIBLIOGRAFÍA

- ASTIGARRA URQUIZA JULIO. HORNOS. HORNOS DE ALTA FRECUENCIA Y MICROONDAS. Sexta Edición, Santa fe de Bogota Colombia, Mc Graw Hill 1990.
- LAZARO ANTONIO M. LABVIEW. PROGRAMACIÓN GRÁFICA PAA EL CONTROL DE INSTRUMENTACIÓN. España, Paraninfo 1996.
- JOSE RAMON SENDRA. DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS (PDF). España, Abril 18 de 2001.
- SEDRA ADEL S, SMITH KENNETH C. CIRCUITOS MICROELECTRÓNICOS. Cuarta Edición. México. Editorial Oxford University Press 1999.
- FISO TECHNOLOGIES INC. UMI. OPERANTING MANUAL. Versión 4.4.x. Canadá 2002.

- GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC, AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHz) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.
- Guy, A. W.; Lin, J. C.; Kramar, P.O.; Emery, A. Effect of 2450-MHZ radiation on the rabbit eye. IEEE Transactions on Microwave Theory Technique, MTT-23:492498; 1975.
- [http://www. Analog.com](http://www.Analog.com)
- <http://www.ti.com>
- <http://www.fiso.com>

ANEXO A. NOCIONES BÁSICAS SOBRE SEGURIDAD

A.1 LÍMITES DE SEGURIDAD

Los límites de seguridad han sido clasificados para dos tipos de público expuesto a microondas; uno de ellos el de trabajadores que dentro de sus industrias y/o empleos se encuentran directamente expuestos a la radiación (exposición ocupacional), y el otro grupo lo conforman las demás personas considerado como la población en general (exposición poblacional) cuyos límites de exposición de radiofrecuencia son menores que los del grupo mencionado anteriormente debido principalmente a los siguientes factores:

- Área de ocupación (metros cuadrados de exposición)
- La duración total y el tiempo promedio de exposición
- Características espaciales de exposición, es decir, si es el cuerpo entero o algunas partes de éste.
- La uniformidad del campo de la exposición, es decir, el promedio espacial, entre otros.

Los límites básicos que proporcionan las entidades que se han dedicado a estos estudios sobre seguridad¹ vienen dados en términos de las intensidades de campo eléctrico, magnético y de densidad de potencia, además de ello se muestran en términos de la proporción a la cual la energía electromagnética de las radiofrecuencias es absorbida por el cuerpo humano. Esta última es expresada particularmente como la tasa específica de absorción o en algunos casos también conocida como la tasa específica de absorción de energía electromagnética (SAR); la cual más estrictamente es definida como la tasa de energía de radiofrecuencia absorbida por unidad de masa en el cuerpo. La SAR posee entonces unidades de watts por kilogramo (W/kg).

Las cantidades recomendadas para medir, tomando en cuenta los diferentes rangos de frecuencia y ondas son las que siguen:

- Densidad de corriente, J , en el rango de frecuencia hasta 10 MHz
- Corriente, I , en el rango de frecuencia hasta 110MHz.
- Tasa específica de absorción de energía, SAR, en el rango de frecuencia de 100 kHz-10GHz.
- Absorción de energía específica, SA, para campos pulsantes en el rango de frecuencia de 300MHz- 10GHz.
- Densidad de potencia, en el rango de frecuencia de 10-300GHz.

¹ ICNIRP International Commission on No-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time – varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz).

Las intensidades de campos máximas están a niveles que puedan generar una SAR o una corriente inducida en el cuerpo que no supere el límite básico, para el caso de las microondas se fijan los límites en relación a la SAR los cuales aparecen en los apartados A.1.2.2 y A.1.3.2 de la presente sección. En ciertos casos y en algunos márgenes de frecuencias específicos, los niveles más altos de exposición pueden ser excedidos pero solo para cortas duraciones de tiempo.

Las intensidades del campo y la densidad de potencia son promediadas y halladas generalmente sobre un período de tiempo correspondiente a un décimo de hora (0.1h o 6mín).

A.1.2 EXPOSICIÓN OCUPACIONAL

A.1.2.1 Límites de intensidad de campos para exposición ocupacional.

Una persona que trabaje en ambientes donde hay presencia de campos de radiofrecuencia y microondas, que estén dentro del rango de frecuencias que se muestran en la columna 1 de la tabla 1, estarán expuestos a radiación electromagnética si la intensidad del campo excede el valor mostrado en la columna 2 y 3 de la tabla 1, cuando la medida del campo se realiza haciendo promedio espacial a lo largo de un determinado periodo de tiempo promedio; o si la densidad de potencia excede el valor mostrado en la columna 4 de la tabla 1, cuando se promedia

espacialmente y sobre el tiempo. Promedio espacial se refiere al promedio que es llevado sobre un área equivalente a la sección transversal del cuerpo humano (área de trabajo). El promedio con base en el tiempo que se utiliza es 0.1 h (6 min.) y puede ser empleado para frecuencias por debajo de 15 GHz. Por encima de esta frecuencia se emplea un promedio de tiempo diferente².

Tabla 1. Límites de Exposición ocupacional (Límites para trabajadores expuestos a RF y microondas).

1 Frecuencia (MHz)	2 Intensidad de campo eléctrico (V/m)	3 Intensidad de campo magnético (A/m)	4 Densidad de Potencia (W/m ²)	5 Tiempo promedio (min)
0.003 - 1	600	4.9	-	6
1 - 10	600/f	4.9/f	-	6
10 - 30	60	4.9/f	-	6
30 - 300	60	0.163	10	6
300 - 1500	$3.54f^{0.5}$	$0.0094f^{0.5}$	f/30	6
1500 - 15000	137	0.364	50	6
15000 - 150000	137	0.364	50	$616000/f^{1.2}$
150000 - 300000	$0.354f^{0.5}$	$9.4*10^{-4}f^{0.5}$	$3.33*10^{-4}f$	$616000/f^{1.2}$

Fuente: Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz. Safety Code 6.

² Información mas detallada del promedio espacial y promedio en el tiempo se dan en el capítulo 3 de medidas y evaluaciones.

Para la tabla 1, f representa el valor de la frecuencia que se está manejando.

A.1.2.2 Límites de la tasa Específica de Absorción

La SAR como se define es una medida de la proporción de la energía electromagnética que es absorbida por el cuerpo. A frecuencias entre 100 kHz y los 10 GHz, los límites de la SAR tienen prioridad sobre los límites de la intensidad de campo y la densidad de potencia y en ninguno de los casos debe ser excedida.

Los límites de la SAR para exposición ocupacional se muestran en la tabla 2 divididos en SAR promedio de toda la masa corporal y la SAR de ciertas zonas especiales del cuerpo en donde la medida es llamada SAR promedio local o localizada que corresponden a medidas de la SAR de la cabeza, el cuello y tronco y además se presenta la SAR en las extremidades sobre una masa de 10 gramos de tejido.

La SAR debe determinarse para los casos donde la exposición recibida este a 0.2 m o menos de la fuente. Para las condiciones donde la determinación de la SAR es impráctica, se llevarán a cabo las medidas de intensidad de campo y densidad de potencia.

Tabla 2. Límites de la SAR para exposición ocupacional (Trabajadores expuestos a RF y Microondas).

Condición	Límite de SAR (W/kg)
SAR promedio sobre toda la masa corporal del cuerpo	0.4
SAR promedio local para la cabeza, cuello y tronco sobre cualquier Gramo de tejido	8
SAR en las extremidades promediado sobre 10 g de tejido	20

Fuente: Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz. Safety Code 6.

A.1.3 EXPOSICIÓN POBLACIONAL.

En contraste, el público en general comprende individuos de todas las edades y de estados de salud variables, y puede incluir grupos o individuos particularmente susceptibles. En muchos casos los miembros del público no están conscientes de su exposición a los campos electromagnéticos. Más aún, no se puede esperar que los miembros individuales del público, tomen precauciones razonables para minimizar o evitar su exposición. Son estas consideraciones las que soportan la adopción de restricciones más severas a la exposición del público que para la población expuesta ocupacionalmente.

A.1.3.1 Límites de intensidad de campos para exposición poblacional

Las personas diferentes a trabajadores expuestos a RF y microondas son clasificadas como personas sometidas a exposición poblacional. Una persona clasificada dentro del grupo poblacional que se encuentre en sitios donde hay presencia de campos que estén dentro del rango de las frecuencias que se muestran en la columna 1 de la tabla 3, estará expuesta a la radiación electromagnética si la intensidad del campo excede el valor mostrado en las columnas 2 y 3 de la tabla 3, cuando se promedia espacialmente a lo largo de un determinado período de tiempo promedio, o si la densidad de potencia excede el valor mostrado en la columna 4 de la tabla 3, cuando se promedia espacialmente y sobre el tiempo. El promedio espacial y el promedio en el tiempo en la exposición poblacional tienen las mismas consideraciones de los promedios utilizados para los límites de exposición ocupacional³.

³ Para el promediado espacial se utiliza las mismas ecuaciones y consideraciones en ambos grupos, ocupacional y poblacional. La forma de determinar estos valores se explica en capítulo 3 del presente informe correspondiente a medidas y evaluaciones.

Tabla 3. Límites de Exposición poblacional (Límites para personas comunes diferentes a trabajadores expuestas a RF y microondas.)

1 Frecuencia (MHz)	2 Intensidad de campo eléctrico (V/m)	3 Intensidad de campo magnético (A/m)	4 Densidad de Potencia (W/m ²)	5 Tiempo promedio (min)
0.003 - 1	280	2.19	-	6
1 - 10	280/f	219/f	-	6
10 - 30	28	2.19/f	-	6
30 - 300	28	0.073	2	6
300 - 1500	$1.585f^{0.5}$	$0.0042f^{0.5}$	f/150	6
1500 - 15000	61.4	0.163	10	6
15000 - 150000	61.4	0.163.	10	$616000/f^{1.2}$
150000 - 300000	$0.158f^{0.5}$	$6.67*10^{-4}f^{0.5}$	$6.67*10^{-5}f$	$616000/f^{1.2}$

Fuente: Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz.
Safety Code 6.

En la tabla 3, f representa la frecuencia que se está manejando.

A.1.3.2 Límites de la tasa Específica de Absorción

Los límites de la SAR para la exposición poblacional se muestran en la tabla 4, al igual que para el grupo de exposición ocupacional se muestran tres mediciones de la

SAR divididas en: SAR promedio de toda la masa corporal; ciertas zonas especiales del cuerpo que se denomina SAR promedio local que corresponden a medidas de la SAR en la cabeza, cuello y tronco, y una última división es la SAR en las extremidades sobre una masa de 10 gramos de tejido.

La SAR debe determinarse para los casos donde la exposición recibida esté a 0.2 m o menos de la fuente. Para las condiciones donde la determinación de la SAR es impráctica, se llevarán a cabo las medidas de intensidad de campo y densidad de potencia.

Tabla 4. Límites de la SAR para exposición poblacional (Personas comunes diferentes a trabajadores que están expuestas a RF y Microondas).

Condición	Límite de SAR (W/kg)
SAR promedio sobre toda la masa corporal del cuerpo	0.08
SAR promedio local para la cabeza, cuello y tronco sobre cualquier Gramo de tejido	1.6
SAR en las extremidades promediado sobre 10 g de tejido	4

Fuente: Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz. Safety Code 6.

La exposición de la población en general a campos electromagnéticos de microondas, correspondiente a frecuencias por encima de 10 MHz, no debe exceder una SAR promedio de 0.04 W/kg a 0.08 W/kg (valor promedio sobre cualquier

periodo de 30 min – 0.5 h -) o una SAR loc máx de 0.8 – 1.6 W/kg (valor promedio sobre cualquier período de 30 min – 0.5 h -).

En consecuencia, la SAR promedio para toda persona que forma parte del público en general (población general) y expuesta permanentemente, no deberá exceder el valor de 0.08 W/kg. La racionalidad de esta reducción por un factor de 5, está fundamentada sobre las bases de períodos de exposición de las personas consideradas como trabajadores y las demás consideradas como poblacional: 40 horas por semana (ocupacional 8 horas diarias) y 168 horas por semana (poblacional 24 hrs. diarias) = 0.2.

A.2 HORNOS MICROONDAS

Enfocado al diseño de un equipo prototipo que contienen características y partes parecidas a los de los hornos microondas convencionales; se nombran en el presente capítulo características básicas de seguridad que son tenidas en cuenta en los hornos y que muy pasaran a ser parte de los manuales de seguridad del equipo prototipo.

Para la manipulación de los hornos microondas se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Funciones tales como ajustar los voltajes aplicados, reemplazar los componentes generadores de potencia de microondas, desmontar los componentes del horno y reajustar las guías de onda, debe ser emprendido por personal calificado y especialmente preparado para tales oficios.
- Se requiere de cuidados especiales para asegurarse de no causar daños a la parte del horno que hace contacto con la puerta o con el marco de la puerta.
- Se debe desconectar la potencia principal antes de retirar la carcasa exterior del horno
- Antes de introducir las manos a los hornos, los condensadores de alto voltajes deben descargarse de una manera segura.
- Los enclavamientos (interlocks) de la puerta no deben ser quitados ni anulados.

A.2.1 SEGURIDAD EN MICROONDAS

La radiación se asocia a la parte del espectro electromagnético ($\lambda < 100 \cdot 10^{-9} \text{m}$) que puede tener efectos acumulativos sobre el cuerpo humano y producir daños irreversibles a largo plazo. Las altas frecuencias y las microondas se encuentran muy

lejos de la parte ionizante del espectro y hasta donde se conoce su efecto sobre el cuerpo humano es únicamente térmico.

Una buena característica de las microondas es que se dispersan rápidamente en la atmósfera, por ejemplo la máxima radiación encontrada por cm^2 a cierta distancia de su fuente es de 5 mW a 0.05 m, 0.14mW a 0.3048 m, 0.05 mW a 0.508 m y 0.005 mW a 1.524 m. Por esto, la radiación recibida por el cuerpo humano depende de la distancia a la que se encuentre, ya que si está a 0.05 m está expuesto a 5 mW, pero si se retira a una distancia de 0.508 m el nivel de exposición se reduce en un factor de 100 (el cuadrado de la distancia) a 0.05 mW/cm^2 . Como norma de seguridad⁴ se exige una densidad de potencia en el exterior de la instalación de horno industriales inferior a 25 mW/cm^2 y un tiempo de exposición menor a 8 horas diarias para una densidad de 10 mW/cm^2 . Además, las microondas pueden causar interferencia en los marcapasos, aunque dicho inconveniente ya se han solucionado en las últimas generaciones de estos aparatos electrónicos.

A.2.2 SISTEMAS DE SEGURIDAD EN UN HORNO

Un horno microondas posee diferentes métodos o dispositivos con el fin de proporcionar la seguridad al usuario en el aspecto referente a la radiación de microondas por ello ataca aspectos como prevenir la radiación de microondas cuando la puerta esta abierta y la prevención de fugas, entre otras. Muchos de los

⁴ Consultar Hornos de Alta frecuencia y microondas (Bibliografía 10).

sistemas de seguridad aquí nombrados, que hacen parte de los hornos microondas deben formar parte los sistemas de seguridad del equipo prototipo, ya que la mayoría de estos elementos, están encaminados a la protección de los usuarios ante la eventual exposición directa que puedan tener estos a la radiación de microondas.

Para ello los hornos microondas poseen cierta cantidad de dispositivos encaminados a la protección y seguridad que son:

- Interlocks de seguridad
- Fusibles
- Interruptores térmicos
- Diseños especiales en la puerta del microondas entre otros.

A.2.2.1 Interruptores De Seguridad (Interlocks)

Están dispuestos con el fin de evitar que el horno llegue a funcionar con la puerta abierta y evitar así que toda la radiación salga de la cavidad causando así efectos potencialmente peligrosos a la persona que utiliza el horno microondas. Precisamente este sistema de interruptores hace que el aparato solo funcione con la puerta totalmente cerrada. Se poseen generalmente en los sistemas de hornos microondas tres interruptores, conocidos como primarios, secundarios y de seguridad.

Los interruptores son activados por el movimiento de la puerta. Los interruptores primarios y secundarios cortan la energía del aparato cuando la puerta se abre mientras que el de seguridad muestrea el trabajo de ambos interruptores quemando el fusible en línea para cortar la energía en caso de que no funcionen.

La presencia de esta serie de interlocks fue reglamentada por lo distintos organismos de seguridad en el mundo con el fin de evitar que la energía de la línea de AC llegue hasta el magnetrón, a menos que se reúnan algunas condiciones; en este caso que la puerta este cerrada.

De los tres interruptores interlocks dos de ellos son de naturaleza normalmente abierta y uno más es normalmente cerrado. Estos interruptores se alojan en la cavidad a donde llegan los pequeños “ganchos” que se usan para asegurar la puerta cuando está cerrada.

Los fabricantes distribuyen los interruptores de modo que en un gancho hay dos interruptores uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado mientras que en el otro gancho solo hay uno que es de tipo normalmente abierto.

- Operación de los switches interlock

Cuando la puerta se cierra, el primer interruptor que se acciona es el que esta normalmente cerrado, es decir se abre. A continuación, se cierra el interruptor de interlock secundario y finalmente se cierra el interruptor primario.

Esta secuencia garantiza que en ningún momento se establezca un cortocircuito directo entre los terminales de la línea AC (si se abre el primero el interruptor monitor, tendremos tres switches abiertos y al cerrarse los interruptores 2 y 1 la energía del horno de la línea de AC llega sin problemas al resto del horno).

Al abrir la puerta, la secuencia de generación es exactamente la inversa: primero se abre el interruptor primario, luego el secundario y finalmente se cierra el monitor.

A.2.2.2 Interruptores Térmicos

Antes del embobinado primario del transformador de Alto Voltaje aparecen dos o mas interruptores de tipo térmico, los cuales sensan constantemente la temperatura en distintas partes del horno. De manera que si el magnetrón, la guía de ondas y la cavidad sufren sobrecalentamiento el interruptor se abrirá y el horno inmediatamente será desactivado.

A.2.2.3 Fusibles

Son fusibles de 15 o más amperes colocados en la línea de alimentación.

A.2.3 PREVENCIÓN DE FUGAS

Puesto que las microondas no pueden dispersarse a través de las paredes de la cavidad el único camino por el que podrían fugarse es la ranura que se forma entre la compuerta y la propia cavidad.

Para evitar fugas de radiaciones hacia la periferia de la compuerta se incluyen tres dispositivos de seguridad adicionales:

- a) Un sello capacitivo que consiste en un material dieléctrico que cubre la superficie de contacto para reducir la posibilidad de arco.
- b) Sistema de choke de puerta: El choke es una cavidad que a su vez se dispone dentro de la misma puerta, para actuar como trampa de posibles fugas de radiaciones al exterior y cuya magnitud es $\frac{1}{4}$ de la longitud de una onda empleada. Normalmente en los hornos la longitud de onda es de 12cm, por lo que el espacio vacío en el interior de la puerta es de unos tres centímetros.

- c) Banda de goma de ferrita que se ubica alrededor de la puerta en forma de tira y que es capaz de absorber la energía de las microondas que hayan escapado entre la puerta y el horno. Esta banda ha sido diseñada para absorber eficientemente frecuencias alrededor de 2450MHz.

A.2.3.1 La Construcción De La Puerta.

La ventana del horno esta cubierta por una lámina metálica con múltiples perforaciones. El tamaño y espaciamiento de estas perforaciones son lo suficientemente amplias como para permitir el paso de la luz visible, debido principalmente a su alta frecuencia; sin embargo, las ondas amplias y de baja frecuencia de las emisiones empleadas para la cocción de alimentos no son capaces de por estos orificios tan pequeños.

Las frecuencias amplias y de alta energía como son las microondas (comparadas de las frecuencias de la luz) pueden ser controladas por el tamaño diminuto de los orificios de la ventana, mientras que las ondas de mayor frecuencia y poco potentes como las de luz pueden atravesar los mismos orificios sin problemas.

ANEXO B. HORNOS MICROONADAS

Los hornos microondas son equipos que se utilizan en la vida cotidiana día a día, también están presentes en aplicaciones en el sector textil, maderero, alimenticio y otras aplicaciones industriales. Para adentrarnos en los hornos microondas se revisaran algunas nociones básicas sobre el calentamiento de dieléctricos con microondas pasando luego a la descripción del funcionamiento del horno microondas.

B.1 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

Si se somete un material a radiación electromagnética, se calienta por conversión de la radiación en energía térmica, consecuencia de los frotamientos del movimiento de las cargas eléctricas, bajo la influencia del campo eléctrico correspondiente. Dependiendo del tipo del material expuesto a radiación se tendrán dos casos:

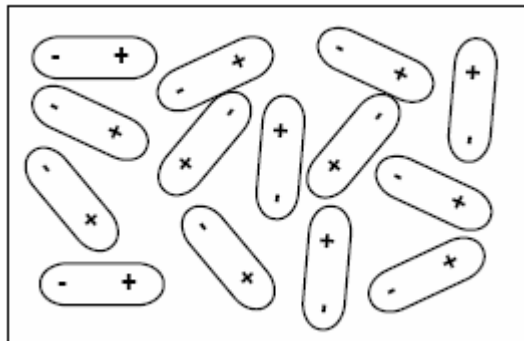
- El calentamiento por inducción de los conductores de electricidad para los que las cargas libres son electrones.
- El calentamiento por histéresis dieléctrica para materiales no conductores que contiene iones o moléculas dipolares.

Este anexo se centrara en dar nociones básicas para el calentamiento de dieléctricos; este calentamiento se basa en que los campos electromagnéticos de alta frecuencia aplicados a materiales dieléctricos o no conductores, dan lugar a un calentamiento rápido y de forma uniforme y, teóricamente la superficie es la que se encontrará al

final del proceso. La susceptibilidad del dieléctrico al efecto del calentamiento por un campo electromagnético depende de la frecuencia, es decir, existirá una frecuencia óptima para el calentamiento o frecuencia de resonancia. A continuación se presenta una pequeña ilustración de este fenómeno.

En un cuerpo cualquiera que se pueda calentar con microondas en estado neutro, el calentamiento no se manifiesta porque sus moléculas están polarizadas al azar, como se muestra en la figura 1.

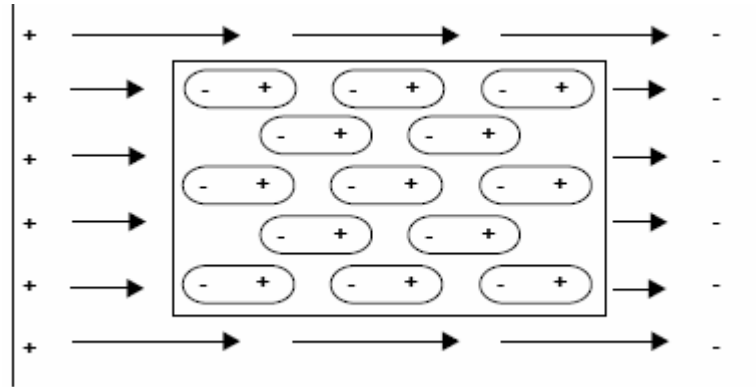
Figura B.1. Moléculas de un Cuerpo Polarizadas al Azar



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

Pero si estas son expuestas a la interacción de un campo electromagnético se alinearan como se muestra en la figura 2

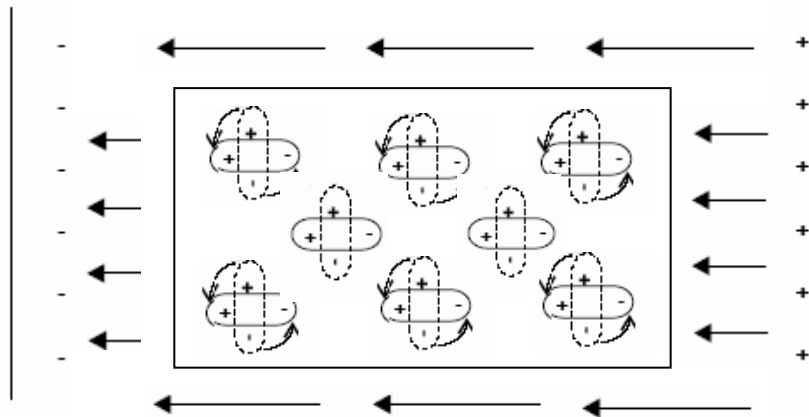
Figura B.2. Alineación de las Moléculas en Presencia de un Campo Electromagnético



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

Si se invierte la polaridad del campo electromagnético, la tendencia de las moléculas es modificar su posición de modo de orientarse conforme a la nueva acción del campo. Entonces si se tuviera un campo electromagnético que este cambiando constantemente la polaridad la respuesta seria que las moléculas cambiarían de posición rápidamente, intentando acompañar las modificaciones del campo y, en consecuencia, habría producción de calor (Figura 3); entonces el material se calentaría en función de la energía gastada en el proceso por la propia vibración de sus moléculas.

Figura B.3. Moléculas en Presencia de un Campo Electromagnético Variable



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

Para que ocurra el proceso de calentamiento no se puede usar cualquier tipo de señal electromagnética. Para penetrar en los dieléctricos y producir calor, la frecuencia debe ser elevada en el rango de las microondas y a una potencia considerable.

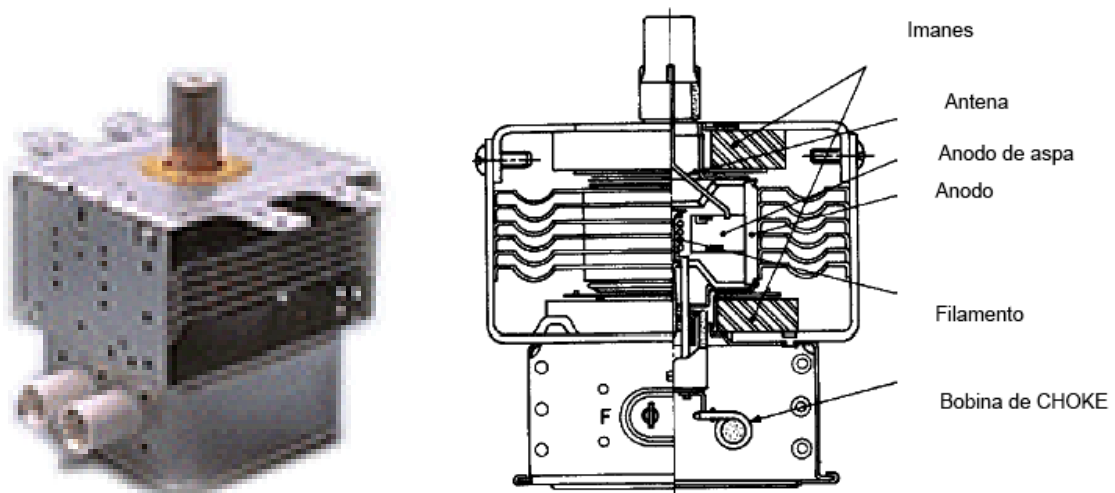
En un horno microondas por lo general se manejan frecuencias de 2.45GHz, lo cual significa que el campo electromagnético generado se invierte y retorna a su posición original 2450 millones de veces por segundo; para producir una señal en esta frecuencia, que corresponde a la gama de las microondas, con la potencia indicada, se necesitan dispositivos especiales.

B.2 EL MAGNETRON

Para entender el funcionamiento de este elemento, recordemos el principio de operación de un circuito resonante el cual esta constituido por un condensador y una bobina conectados en paralelo. Los dispositivos almacenan energía pero de forma diferente, de tal manera que cuando se conectan entre sí, y a su vez se conecta el conjunto a una fuente de energía, se genera una corriente alterna.

El magnetrón es el componente fundamental de un horno microondas; en la figura 4 se presenta una vista seccionada de este dispositivo así como una fotografía que muestra su aspecto exterior.

Figura B.4. Vista Transversal y Aspecto Exterior de un Magnetrón

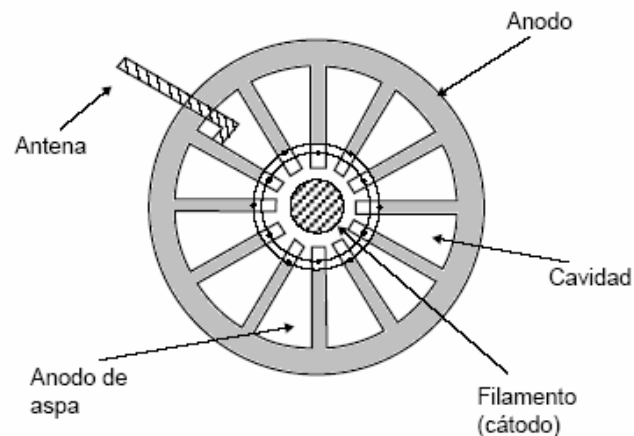


Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

Realmente el diseño y la estructura de un magnetrón varia según el modelo del mecanismo al que pertenece, pero en su configuración básica se incluye un ánodo, un filamento (con su respectivo cátodo), imanes y una antena.

Como se muestra en la figura 5, el ánodo es una pieza ahuecada de hierro con ranuras abiertas, formando una especie de aspas en número par apuntando hacia el filamento (cátodo) desde la pared exterior, y la antena a su vez va conectada a una aspa del ánodo; las dimensiones de las cavidades son función de la longitud de onda de la señal que debe ser generada.

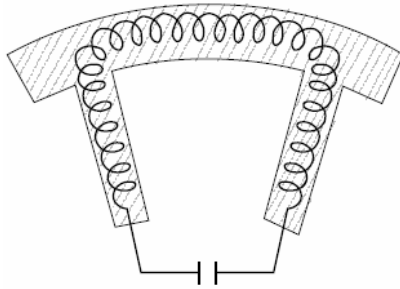
Figura B.5. Esquema de las Cavidades en un Magnetrón



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

El comportamiento de un par de aspas a altas frecuencias es de inductor, en cuanto al espacio vacío entre ellas se comporta como una capacitancia estableciendo así un circuito resonante en la frecuencia generada (figura 6).

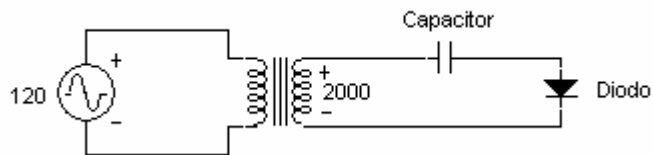
Figura B.6. Esquema de la Inductancia y la Capacitancia en un Magnetrón



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

Todo horno microondas posee un transformador de alto voltaje, el cual con algunos elementos auxiliares como un condensador y un diodo conformará un circuito doblador de tensión de aproximadamente 4000 Volt (figura 7). El polo positivo va al ánodo y el negativo al cátodo

Figura B.7. Doblador de Tensión para Alimentar el Magnetrón

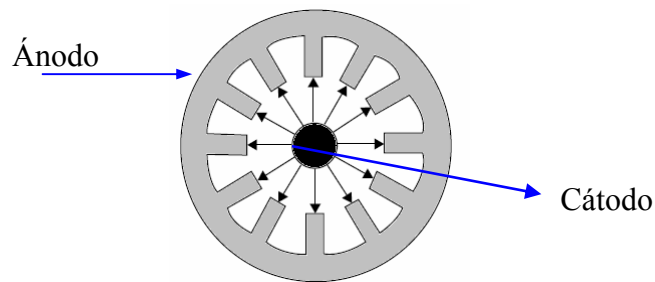


Fuente:Autores

El funcionamiento del bulbo como oscilador puede ser visto de la siguiente manera:

Si ninguna fuerza adicional actuase sobre el haz de electrones en el interior del magnetrón, habría un flujo simple del cátodo hacia el ánodo, como muestra en la figura 8.

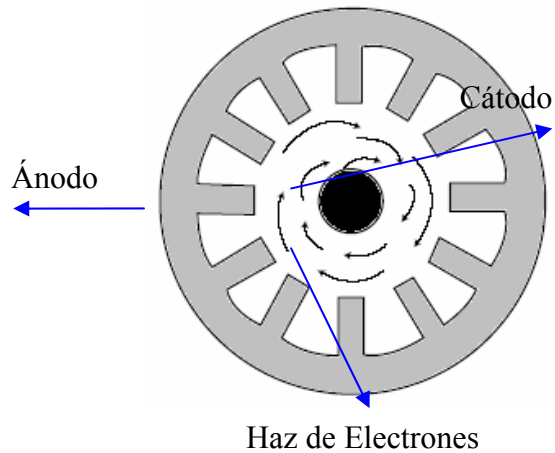
Figura B.8. Trayectoria de Electrones de Cátodo a Ánodo sin Fuerza Externa



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

Sin embargo, este dispositivo incluye dos imanes permanentes que actúan sobre el haz de electrones que sufren una desviación en su trayectoria; si la intensidad del campo magnético es muy alta los electrones viajarán en una trayectoria circular como se muestra en la figura 9.

Figura B.9. Trayectoria del Haz de Electrones en Presencia de un Campo Magnético.

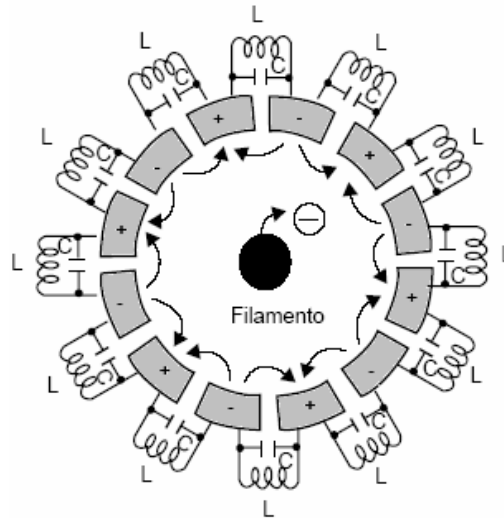


Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

El movimiento de los electrones es responsable de la inducción de una corriente alterna en las cavidades del ánodo, este efecto se describe a continuación.

Cuando un electrón se aproxima al segmento entre dos cavidades, son inducidas cargas eléctricas en el segmento. Los movimientos de los electrones y la inducción de las cargas pueden ser explicados como si existiesen circuitos resonantes en los segmentos, como muestra la figura 10.

Figura B.10. Representación del Movimiento de los Electrones y la Inducción de las Cargas por Medio de Circuitos Resonantes



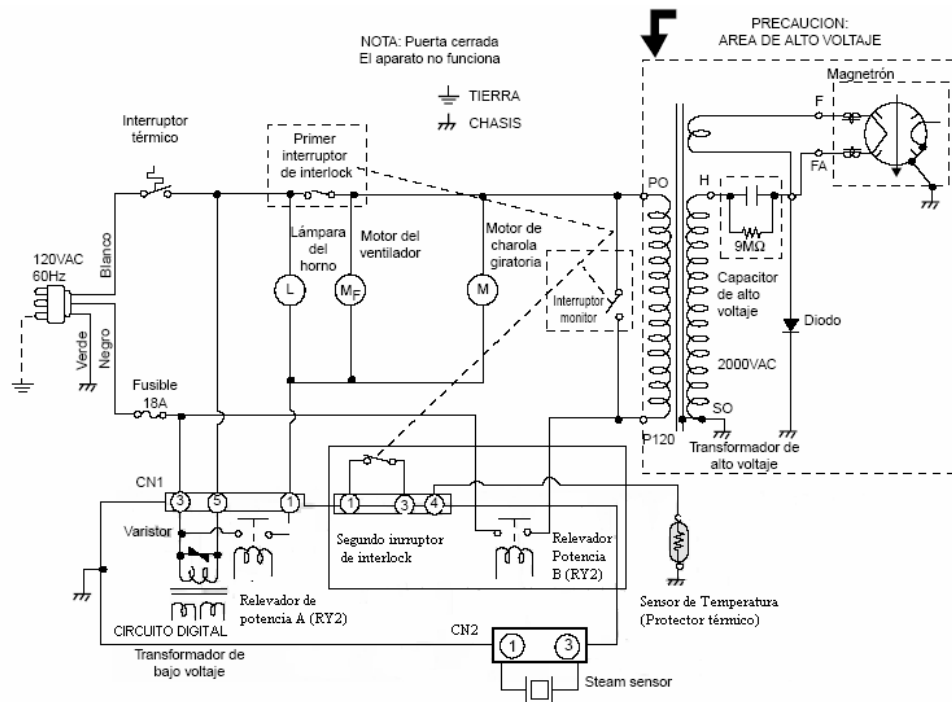
Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

En la práctica, la inducción de las cargas no ocurre por electrones aislados. Los electrones hacen una espiral, tomando la forma de una rueda con rayos, con eso induce cargas mucho mayores y genera potencias elevadas. Los circuitos resonantes son, entonces, constantemente excitados y se mantienen en oscilación en la frecuencia que les corresponde. La energía generada en el proceso puede ser retirada a través del terminal de la antena.

B.3 SEGURIDAD

El horno microondas cuenta con tres sistemas de interruptores primarios, secundarios y de seguridad; y su operación es como sigue: los primarios y los secundarios cortan la energía de todo el sistema cuando la puerta se abre; en tanto el interruptor de seguridad muestrea el trabajo de los dos primeros interruptores, quemando el fusible para cortar al energía en caso de que éstos no funcionen.

B.4 CIRCUITO TIPICO DE UN HORNO MICROONDAS



Fuente :Hornos microondas, Leopoldo Parra Reynada

ANEXO C. INSTRUMENTACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO POR FIBRA ÓPTICA

Uno de los más interesantes y recientes desarrollos en el campo de la instrumentación electrónica son los sensores de fibra óptica, que ofrecen características inherentes a ellos, tales como su reducido tamaño, inmunidad a la interferencia electromagnética, alta resistencia a ambientes corrosivos y ásperos, entre otras; que hace de estos sensores muy atractivos para diferentes aplicaciones. En este anexo se hace una descripción general de la tecnología de sensado por medio de fibra óptica, la forma de acondicionamiento y procesamiento para convertir la señal de luz a una unidad física de medida

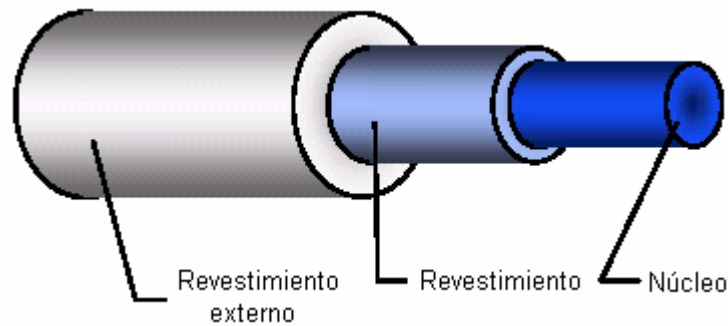
C.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.

C.1.1 Constitución De La Fibra Óptica.

La fibra óptica es hecho de tal manera que permite que los rayos de luz, se mantengan dentro del cable y viajen muy rápido a lo largo de distancias grandes, con bajas perdidas de la señal. Las partes básicas de la fibra son el núcleo y el revestimiento (cladding), que son hechos en silica, que a su vez son cubiertas con una zona intermedia como se muestra en la figura C1, generalmente está hecha con un material elastomérico con el cual se pretende garantizar solidez y protección. En particular los

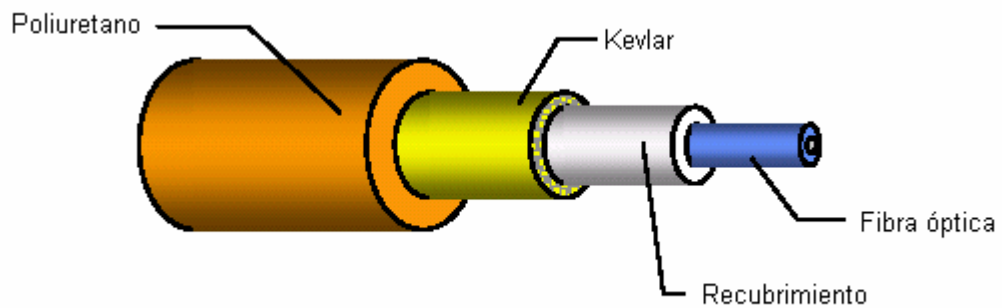
transductores de fibra óptica están provistos de un revestimiento protector externo y una membrana interna resistente, usualmente *Kevlar*, con lo cual se previene exponer la fibra a efectos de torsión durante la utilización en algún tipo de medición, haciéndolas robustas para su utilización en ambientes hostiles. Un esquema con la capa de revestimiento se puede ver en la figura C2.

Figura C1. Estructura de fibra óptica.



Fuente: Advances in Fabry-Perot fiber optic sensor and instruments for geotechnical monitoring.

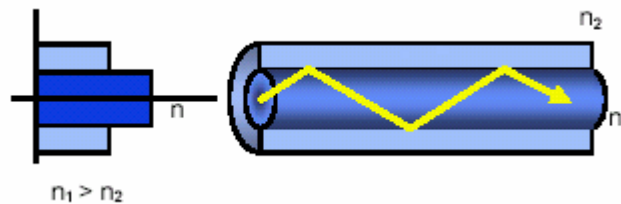
Figura C2. Estructura de la sonda de fibra óptica.



Fuente: Advances in Fabry-Perot fiber optic sensor and instruments for geotechnical monitoring.

Todas las fibras ópticas son hechas de material dieléctrico, lo cual les ofrece completa inmunidad a campos electromagnéticos, ruido de radiofrecuencia y sobrevoltaje. Otra ventaja igualmente importante es la baja atenuación en las fibras ópticas. Las pérdidas típicas que presentan la fibra óptica son de 1 dB/km o menores, con lo cual se quiere decir que el 80% de las señales luminosas alcanzan el final de una fibra óptica de 1 km de longitud. Sin embargo para el caso de los transductores de fibra que utilizan el principio de interferometría Fabry-Perot⁵, la calidad de su medida no es afectada por esta cantidad de atenuación. La luz se propaga por reflexión interna en la fibra entre el núcleo y el revestimiento, la cual posee diferentes índice de refracción que se muestran en la figura C3.

Figura C.3. Reflexión de la luz dentro de la fibra óptica.



Fuente: Advances in Fabry-Perot fiber optic sensor and instruments for geotechnical monitoring.

Las conexiones son hechas comúnmente con conectores usados en la industria de las telecomunicaciones, los cuales poseen cubiertas protectoras y cable enmallado.

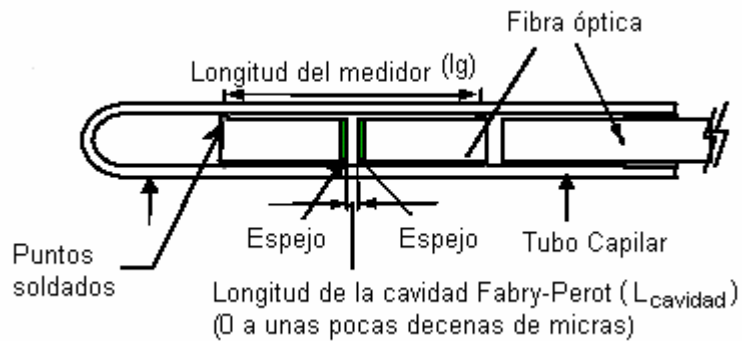
⁵ Esta tecnología será explicada con mas detalle en la siguiente sección

C.2 TRANSDUCTORES EXTRINSECOS FABRY – PEROT

El principio interferométrico Fabry-Perot⁶ está basado en la interferencia de los rayos de luz. Este usa una fuente de luz como fuente generadora. Con esta técnica de medición altamente sensitiva, se pueden obtener medidas precisas y absolutamente lineales, sin necesidad de procesos de estabilización tales como tiempos de precalentamiento de la fuente de luz, al igual, presenta la ventaja de que la fuente es insensible a los cambios de temperatura. Un ejemplo básico utilizado en la construcción de un interferómetro Fabry-Perot es el que se ilustra en la figura C4. El medidor Fabry Perot es un sensor extrínseco, lo cual significa que el elemento de sensado es externo a la fibra óptica. Este sensor consiste en dos espejos hechos con un revestimiento semi-reflectivo y que se encuentran uno en frente del otro. Estos espejos están ubicados en las puntas de la fibra óptica, fijadas por medio de un capilar.

⁶ New generation of Fabry-Perot fiber optic sensors for monitoring of structures.

Figura C4. Sensor extrínseco Fabry-Perot de fibra óptica utilizado en la medición de esfuerzos.



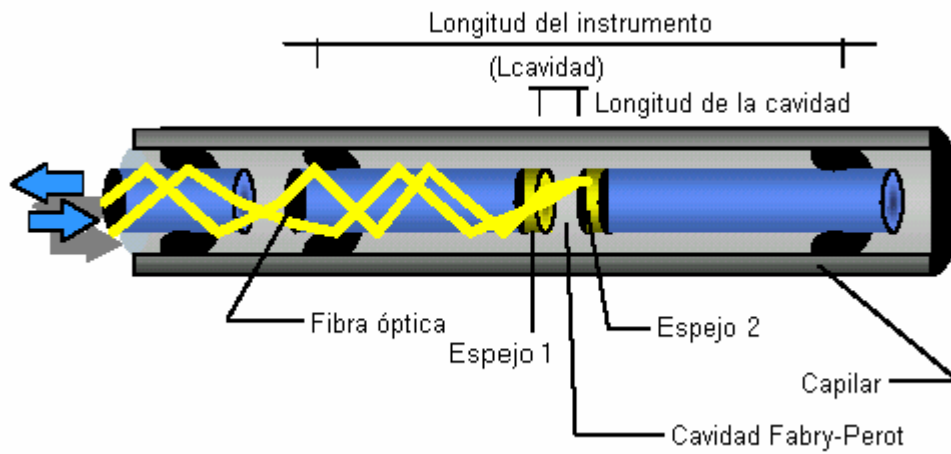
Fuente: New generation of Fabry-Perot fiber optic sensor for monitoring of structures.

El espacio de aire entre los espejos es denominado la longitud de la cavidad Fabry-Perot ($l_{cavidad}$), está varia su longitud desde casi cero hasta unas cuantas décimas de micras, y la distancia de separación que hay entre los puntos de fusión de los espejos es denominada la longitud del medidor (l_g) que se muestran en la figura C4, y es la que estipula el rango de operación y la sensibilidad del transductor.

Su funcionamiento está basado en la emisión de una señal de luz blanca producida por un diodo, que es generada por alguna unidad lectora o unidades acondicionadora de sensores de fibra óptica; esta luz es lanzada hasta el final de la fibra óptica, propagándose por reflexión interna en la fibra y alcanzando el sensor Fabry-Perot que se encuentra localizado al final (figura C5). Una parte de la luz producida por la unidad lectora es reflejada por el primer espejo semi-reflectivo; la luz restante viaja a

través de la cavidad Fabry-Perot y es parcialmente reflejada de nuevo pero esta vez gracias al segundo espejo reflectivo.

Figura C5. Reflexión de la luz en el sensor extrínseco Fabry-Perot.



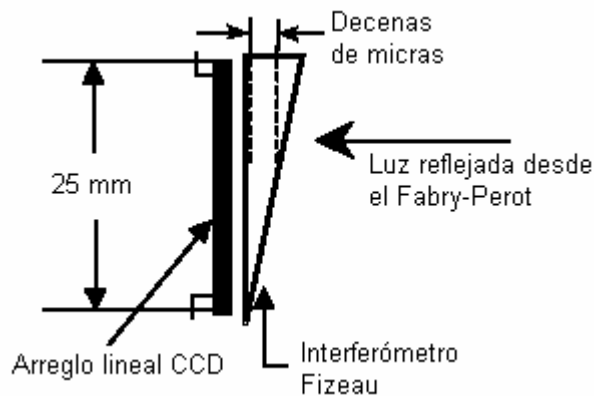
Fuente: Monitoring pavement response during spring thaw using fiber-optic sensors.

Las dos ondas de luz reflejadas retornan a un detector en la unidad lectora, allí la longitud de la cavidad (l_{cavidad}) es determinada por medio de una correlación-cruzada de luz blanca (interferómetro Fizeau) contenido en la unidad lectora, con lo cual se logra la medida del fenómeno físico

C.3 PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.

La conversión de la señal óptica a un valor físico de medida es logrado por medio de un interferómetro Fizeau, y una combinación de arreglos lineales de dispositivos acopladores de carga (CCD) que se muestran en la figura 6, que se encuentran dentro de la unidad de lectura. Esta combinación es llamada correlación-cruzada de la luz blanca.

Figura C6. Interferómetro Fizeau y arreglo CCD.



Fuente: New generation of Fabry-Perot fiber optic sensor for monitoring of structures.

La luz reflejada que regresa del sensor Fabry-Perot ilumina el ancho completo del interferómetro Fizeau, el cual consiste en un interferómetro espacialmente distribuido cuyo espesor varía desde casi cero hasta unas cuantas décimas de micras, exactamente los mismos valores máximos y mínimos de longitud que podrían generarse en la cavidad Fabry-Perot. La luz transmitida a través del interferómetro

Fizeau despliega un pico de potencia en el sitio exacto donde el espesor del interferómetro es igual a la longitud de la cavidad del sensor Fabry-Perot. El arreglo lineal CCD ubicado en el lado posterior del interferómetro Fizeau es usado para localizar la posición del pico de potencia de la luz a lo largo del interferómetro, así de esta manera la longitud de la cavidad llega a conocerse. La señal óptica es convertida a unidad de longitud de la cavidad a una frecuencia dada por la tasa de muestreo de la unidad lectora.

C.4 SENSORES DE TEMPERATURA POR MEDIO DE FIBRA OPTICA.

C.4.1 PRINCIPIO FISICO Y DE DISEÑO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA POR MEDIO DE FIBRA ÓPTICA.

La medición de temperatura en los sensores de fibra óptica se basa en la absorción y transmisión de luz por medio de un semiconductor llamado GaAs (Arsénico de Galio). Cuando la temperatura del cristal se incrementa, el espectro de transmisión del cristal (la luz que no es absorbida), cambia a longitudes de ondas más altas. Así a cualquier temperatura dada, la emisión salta esencialmente a una longitud de onda específica casi inmediatamente. Este salto es llamado cambio de absorción.

La explicación física a este fenómeno es expresada a través de las bandas de energía. Estas bandas se refieren a la energía que requieren los electrones para saltar en el material a un estado excitado. Cuanta más energía, en forma de calor entre al cristal

(en forma de incrementos de temperatura), esta banda se hará mas angosta con lo cual menos energía adicional se necesita para excitar un electrón. Los fotones que llegan al cristal son los que excitan los electrones; si un fotón lleva la suficiente energía para que un electrón cruce la banda, este será absorbido; pero sino no será transmitido. Las longitudes de ondas mas cortas son las que mayor energía cargan. Cuando la banda de energía se hace angosta como consecuencia del incremento de temperatura, es menor la energía necesaria para saltar a través de la banda, entonces los fotones con menos energía son absorbidos, provocando que los electrones crucen la banda y la emisión de longitudes de ondas mas largas. Subsecuentemente, midiendo la posición de los cambios de absorción, se puede obtener la medida de la temperatura en el cristal.

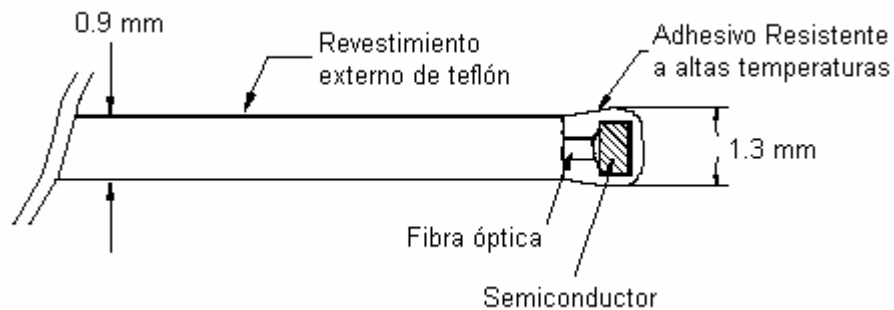
C.4.2 OPERACIÓN SONDA DE TEMPERATURA.

El sensado de temperatura se basa en el contacto directo con el material a medir, con lo cual es necesario que el material semiconductor toque el elemento al cual se le desea hacer la medición (ya sea sólido, o en el caso de líquidos o gases inmersos dentro de ellos). Entre más cercano sea el contacto con el material y más pequeña la masa térmica, más rápida será la respuesta a los cambios de temperatura. Luego es emitida la luz hacia el cristal y se mide la cantidad de luz que fue absorbida, lo que se hace por medio de la fibra óptica a través del principio Fabry-Perot.

Un cristal delgado es pegado a uno de los finales de la fibra óptica tal como se muestra en la figura C7, en uno de los lados de este cristal, se fija una película

reflectiva dieléctrica, con lo cual se impide la conductividad eléctrica, en estos sensores. El semiconductor y la parte final de la fibra se envuelven en un adhesivo resistente a altas temperaturas que además ofrece protección ante agresiones químicas y mecánicas.

Figura C7. Estructura de un sensor de temperatura por fibra óptica.



Fuente: An overview of fiso's fo direct winding temperature measurement system for high voltage transformers.

La forma en que se realiza la medición de temperatura, inicia con la emisión de una luz blanca desde el acondicionador que viaja a través de la fibra hasta el semiconductor donde parte de ésta luz es absorbida. La luz que no es absorbida es reflejada por el espejo dieléctrico y retorna de nuevo al acondicionador donde llega al espectrómetro. La posición de los cambios de absorción es determinada por la unidad de computo del UMI (UNIVERSAL MULTICHANNEL INSTRUMENT) y luego es correlacionada a temperatura. El cálculo de los cambios de absorción no depende de la intensidad de señal del instrumento, sino de la intensidad del color de

interés que llega al acondicionador producto de la reflexión. Consecuentemente los diversos factores que contribuyen a la atenuación en la fibra óptica (longitud de la fibra, número y calidad de las conexiones y composición) no imponen ningún inconveniente al sistema. Además la respuesta semiconductor del cristal es universal, lo que hace que todos los sensores de temperatura sean intercambiables y no necesiten de calibración para su utilización.

**ANEXO D. COMANDOS DE CONTROL DEL UMI (UNIVERSAL
MULTICHANNEL INSTRUMENT) MEDIANTE CONEXIÓN RS-232**



LIST OF REMOTE CONTROL COMMANDS

NAME:	ACQUISITION AVERAGE
SYNTAX:	[TCmmss.ss], [TC]
PARAMETERS:	If none: returns the current value of the <i>Averaging Time</i> Otherwise: mmss.ss is a positive number that set the <i>Averaging Time</i> . mm = number of minutes and ss.ss = number of seconds. Lowest permitted value: 00m00.05s Largest permitted value: 59m59.95s
REMARKS:	See Section 3.2.1
RETURN VALUE:	TCmmss.ss\n\r (or) TC\n\r mmss.ss\n\r (where mmss.ss is the current <i>Averaging Time</i>)
ERROR NUMBER:	10 and 11

NAME:	ACQUISITION DURATION
SYNTAX:	[DAhhmmss.ss], [DA]
PARAMETERS:	If none: returns the current value of the <i>Acquisition Duration</i> Otherwise: hhmmss.ss is a positive number that set the <i>Acquisition Duration</i> of the <i>Acquisition Session</i> . hh = number of hours; mm = number of minutes and ss.ss = number of seconds. Lowest permitted value: 00h00m00.05s. Largest permitted value: 29h59m59.95s Special value: 00h00m00.00 = continuous acquisition (until memory buffer is full)
REMARKS:	See Sections 4.3.4 and 4.3.5
RETURN VALUE:	DAhhmmss.ss\n\r (or) DA\n\r hhmmss.ss\n\r (where hhmmss.ss is the current <i>Acquisition Duration</i>)
ERROR NUMBER:	10

NAME:	ACQUISITION MODE
SYNTAX:	[TMX], [TM]
PARAMETERS:	<p>If none: returns the current <i>Acquisition Mode</i> (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 8, or 9)</p> <p>If X = 0: set acquisition in NORMAL mode (default state)</p> <p>if X = 1: set acquisition in SINGLE mode</p> <p>if X = 2: set acquisition in RS232 mode</p> <p>if X = 3: set acquisition in PROGRAM/CONT mode</p> <p>if X = 4: set acquisition in READY mode</p> <p>if X = 5: reserved for internal use</p> <p>if X = 6: set acquisition in SCAN mode</p> <p>If X = 7: reserved for internal use</p> <p>if X = 8: set acquisition in RS-232/SCAN mode</p> <p>if X = 9: set acquisition in PROGRAM/DATE mode</p>
REMARKS:	See section 4.3.1
RETURN VALUE:	<p>TMX\n\r</p> <p>(or)</p> <p>TM\n\r</p> <p>X\n\r (where X is the current <i>Acquisition Mode</i>)</p>
ERROR NUMBER:	10

NAME:	ACQUISITION RATE
SYNTAX:	[SRhmmss.ss], [SR]
PARAMETERS:	<p>If none: returns the current value of the <i>Acquisition Rate</i></p> <p>Otherwise: h:mm:ss.ss is a positive number that set the <i>Acquisition Rate</i> of the <i>Acquisition Session</i>. h = number of hours; mm = number of minutes and ss.ss = number of seconds.</p> <p>Lowest permitted value,</p> <p style="padding-left: 40px;">in manual scan mode: 0h00m00.05s.</p> <p style="padding-left: 40px;">in automatic scan mode: <i>Scanning Time</i> x Number of activated channels</p> <p>Largest permitted value: 9h59m59.95s</p>
REMARKS:	See Sections 3.2.2, 4.3.4 and 4.3.5
RETURN VALUE:	<p>SRhmmss.ss\n\r</p> <p>(or)</p> <p>SR\n\r</p> <p>hmmss.ss\n\r (where h:mm:ss.ss is the current <i>Acquisition Rate</i>)</p>
ERROR NUMBER:	10



NAME:	ACQUISITION STATE
SYNTAX:	[BU]
PARAMETERS:	None, this command returns, during an <i>Acquisition Session</i> , the remaining number of data measurements to be acquired until the end of the session.
REMARKS:	This function is useful for knowing if an <i>Acquisition Session</i> is terminated or not. Two special cases: If 0 value is returned then <i>Acquisition Session</i> is completed; If -1 value is returned then the UMI is in Wait State (see Figure 4 and Figure 5).
RETURN VALUE:	BU\n\r BU\n\r (or) BUXXXX\n\r (where XXXX is equal to 0, -1, or the number of remaining data points to be acquired until the end of the <i>Acquisition Session</i>)
ERROR NUMBER:	10

NAME:	ANALOG SCALE
SYNTAX:	[#NAVXXXXX.XX], [#NAV]
PARAMETERS:	If none: returns the current <i>SCALE (Analog Scale Factor)</i> value from the analog output of the specified channel number N. Otherwise: XXXXX.XX is a positive or negative number that set the <i>SCALE (Analog Scale Factor)</i> value on the analog output of the specified channel N.
REMARKS:	See Section 3.3.1.
RETURN VALUE:	#NAVXXXXX.XX\n\r #NAV\n\r (or) XXXXXX.XX\n\r (where N is the channel number and XXXXX.YY is the current <i>SCALE</i> value of the channel N analog output)
ERROR NUMBER:	10

NAME:	ANALOG ZERO
SYNTAX:	[#NAZXXXXX.XX], [#NAZ]
PARAMETERS:	If none: returns the current <i>ZERO (Analog Offset)</i> value from the analog output of the specified channel number N. Otherwise: XXXXX.XX is a positive or negative number that set the <i>ZERO (Analog Offset)</i> on the analog output of the specified channel number N.
REMARKS:	See Section 3.3.1
RETURN VALUE:	#NAZXXXXX.XX\n\r (or) #NAZ\n\r XXXXX.XX\n\r (where N is the channel number and XXXXX.XX is the current <i>ZERO</i> value from the channel N analog output)
ERROR NUMBER:	10

NAME:	CHANNEL SELECT
SYNTAX:	[CSN], [CS]
PARAMETERS:	If none: returns the current channel number selected (in manual scan mode) Otherwise: selects the channel number N
REMARKS:	Make sure that the UMI is set to manual scan (if not, selects the appropriate <i>Acquisition Mode</i> like [TM2] mode).
RETURN VALUE:	CSN\n\r (or) CS\n\r N\n\r (where N is the current channel number selected)
ERROR NUMBER:	10

NAME:	CLEAR BUFFER
SYNTAX:	[CB]
PARAMETERS:	None, this command clears the contents of the memory buffer.
REMARKS:	We recommend clearing the memory buffer as soon as the data are downloaded to computer or are not needed anymore in order to release the memory space for the next <i>Acquisition Sessions</i> . See Section 4.3.2.4.
RETURN VALUE:	CB\n\r
ERROR NUMBER:	10



NAME:	DATA DOWNLOAD
SYNTAX:	[DDXX], [DD]
PARAMETERS:	If none: downloads the content of all the <i>Acquisition Series</i> stored in the memory Otherwise: downloads the content of the <i>Acquisition Series</i> number XX stored in the memory
REMARKS:	See Section 4.3.2.3 for information on the content of an <i>Acquisition Series</i>
RETURN VALUE:	DDXX\n\r ----- ----- (See Section 4.3.2.3 for the contents of the <i>Acquisition Series</i>) ----- -----
ERROR NUMBER:	

NAME:	DATE
SYNTAX:	[SY^vyyyy-MM-dd], [SY]
PARAMETERS:	If none: returns the current date of the UMI real-time clock Otherwise: sets the date of the UMI real-time clock, yyyy is the year (four digits), MM is the month (2 digits) and dd is the day (two digits)
REMARKS:	
RETURN VALUE:	SY ^v yyyy-MM-dd\n\r (or) SY\n\r yyyy-MM-dd\n\r (where yyyy-MM-dd is the UMI current date)
ERROR NUMBER:	10



NAME:	DIAGNOSTIC REPORT
SYNTAX:	[DR]
PARAMETERS:	None, used to download the diagnostic report (manual scan mode only).
REMARKS:	First, puts the UMI in manual scan by selecting the appropriate <i>Acquisition Mode</i> (ex. Use [TM2] mode). Second select a channel with the CHANNEL SELECT [CS] command and then proceed with the diagnostic command. See Section 3.3.2
RETURN VALUE:	DR\n\r LIGHT: ^^^^^^XXX\n\r SIGNAL: ^^^^^^XXX\n\r MEMORY: ^^^^^^XXX%\n\r
ERROR NUMBER:	None

NAME:	GAUGE ADD
SYNTAX:	[ASXXXXXXXX] or [AS^YYYY^XXXXXXXX]
PARAMETERS:	XXXXXXXX is the 7-digits <i>Gauge Factor</i> YYYYY is the <i>Gauge Name</i> (5 characters maximum)
REMARKS:	This command adds a <i>Gauge Factor</i> (and <i>Gauge Name</i>) to the <i>Gauge List</i> . The <i>Gauge Name</i> is optional. See Section 3.1.2
RETURN VALUE:	ASXXXXXXXX\n\r (or) AS^YYYY^XXXXXXXX\n\r
ERROR NUMBER:	1, 10

NAME:	GAUGE ERASE
SYNTAX:	[RSXXXXXXXX] or [RS^YYYY]
PARAMETERS:	XXXXXXXX is the 7-digits <i>Gauge Factor</i> YYYYY is the <i>Gauge Name</i> (5 characters maximum)
REMARKS:	This command erases a <i>Gauge Factor</i> from the <i>Gauge List</i> . The <i>Gauge Factor</i> can be erased by mean of its associated <i>Gauge Name</i> as well. See Section 3.1.2
RETURN VALUE:	RSXXXXXXXX\n\r (or) RS^YYYY\n\r
ERROR NUMBER:	12



NAME:	GAUGE LIST
SYNTAX:	[LG]
PARAMETERS:	None, returns the content of the <i>Gauge List</i>
REMARKS:	An "END" string is added at the end of the list. The <i>Gauge Name</i> is sent as a five-character string, so space characters may be present. See Section 3.1.2
RETURN VALUE:	<pre> LG\n\r GAUGE NAME^GAUGE FACTOR\n\r GAUGE NAME^GAUGE FACTOR\n\r GAUGE NAME^GAUGE FACTOR\n\r ----- GAUGE NAME^GAUGE FACTOR\n\r END\n\r </pre>
ERROR NUMBER:	None

NAME:	GAUGE SELECT
SYNTAX:	 [#NGAXXXXXXX] or [#NGA^YYYYY], [#NGA]
PARAMETERS:	<p>If none: returns the <i>Gauge Name</i> YYYYY (five-character string format) and <i>Gauge Factor</i> XXXXXX currently assigned in the Channel N.</p> <p>Otherwise: assigns the <i>Gauge Factor</i> XXXXXX to the channel number N. The <i>Gauge Factor</i> can be assigned by mean of its associated <i>Gauge Name</i> YYYYY as well</p>
REMARKS:	See Section 3.1.2.2
RETURN VALUE:	<pre> #NGAXXXXXXX\n\r (or) #NGA^YYYYY\n\r (or) #NGA\n\r GAUGE NAME^GAUGE FACTOR\n\r (currently assigned in channel number N) </pre>
ERROR NUMBER:	10, 12



NAME:	LIST TAG
SYNTAX:	[LTXX], [LT]
PARAMETERS:	<p>If none: returns a summarized list of all the <i>Acquisition Series</i>. For each of the series, the list provides the <i>Acquisition Series #</i>, the date, the time and the number of data measurements. The list ends with an "END" string.</p> <p>Otherwise: returns a summary of the <i>Acquisition Series # XX</i>. In that case, the summary consists of the four-line header of the <i>Acquisition Series # XX</i></p>
REMARKS:	See also the DATA DOWNLOAD [DD] command and Section 4.3.2.3
RETURN VALUE:	<pre>LT\n\r 1\tDATE\tTIME\tNUMBER OF DATA POINTS\n\r 2\tDATE\tTIME\tNUMBER OF DATA POINTS\n\r\n\r\n\r\n\r N\tDATE\tTIME\tNUMBER OF DATA POINTS\n\r END\n\r</pre> <p style="text-align: center;">(or)</p> <pre>LTX\n\r XX\tRATE\tAVERAGE\tDATE\tTIME\tUNITS\n\r (See section 4.3.2.3) N\n\r (Channel number N) GAUGE NAME\n\r GAUGE FACTOR\n\r (Assigned Gauge Factor and its associated Gauge Name above)</pre>
ERROR NUMBER:	None

NAME:	PROGRAM# AVERAGE
SYNTAX:	[SD [^] X [^] mmss.s]
PARAMETERS:	<p>mmss.s is the value that sets the <i>Averaging Time</i> of the <i>Acquisition Program</i> number X (X= 1 to 5)</p> <p>mm = number of minutes and ss.s = number of seconds.</p> <p>Lowest permitted value: 00m00.05s</p> <p>Largest permitted value: 59m59.95s</p>
REMARKS:	See Sections 4.3.2.2 and 3.2.1
RETURN VALUE:	SD [^] X [^] mmss.s\n\r
ERROR NUMBER:	10



NAME:	PROGRAM# ENDDATE
SYNTAX:	[SG [^] X [^] yyyyMMdd]
PARAMETERS:	yyyyMMdd is the value that sets the Ending Date of the <i>Acquisition Program</i> number X (X= 1 to 5). yyyy is the year (four digits), MM is the month (2 digits) and dd is the day (two digits).
REMARKS:	See Section 4.3.2.2
RETURN VALUE:	SG [^] X [^] yyyyDDdd\n\r
ERROR NUMBER:	10

NAME:	PROGRAM# ENDTIME
SYNTAX:	[SB [^] X [^] hhmmss]
PARAMETERS:	hhmmss is the value that sets the Ending Time of the <i>Acquisition Program</i> number X (X= 1 to 5)
REMARKS:	See Section 4.3.2.2
RETURN VALUE:	SB [^] X [^] hhmmss\n\r
ERROR NUMBER:	10

NAME:	PROGRAM# RATE
SYNTAX:	[SC [^] X [^] hmmss.s]
PARAMETERS:	hmmss.s is the value that sets the <i>Acquisition Rate</i> of the <i>Acquisition Program</i> number X (X= 1 to 5) h= number of hours, mm = number of minutes and ss.s = number of seconds. Lowest permitted value, in manual scan mode: 0h00m00.05s in automatic scan mode: <i>Scanning Time</i> x Number of activated channels Largest permitted value: 9h59m59.95s
REMARKS:	See Section 4.3.2.2
RETURN VALUE:	SC [^] X [^] hmmss.s\n\r
ERROR NUMBER:	10



NAME:	PROGRAM# SHOW
SYNTAX:	[SEX [^] D], [SE [^] X],
PARAMETERS:	X is the <i>Acquisition Program</i> number for which the UMI returns the program acquisition parameters. The "D" parameters includes the Starting and Ending Time in the returned values (see below)
REMARKS:	See Section 4.3.2.2
RETURN VALUE:	SEX [^] D\n\r STARTING DATE [^] STARTING TIME [^] ENDINGDATE [^] ENDINGTIME [^] RATE [^] AVERAGE (or) SEX\n\r STARTING TIME [^] ENDINGTIME [^] RATE [^] AVERAGE
ERROR NUMBER:	10

NAME:	PROGRAM# STARTDATE
SYNTAX:	[SF [^] X [^] yyyyMMdd]
PARAMETERS:	yyyyMMdd is the value that sets the Starting Date of the <i>Acquisition Program</i> number X (X= 1 to 5). yyyy is the year (four digits), MM is the month (2 digits) and dd is the day (two digits).
REMARKS:	See Section 4.3.2.2
RETURN VALUE:	SF [^] X [^] yyyyDDdd\n\r
ERROR NUMBER:	10

NAME:	PROGRAM# STARTTIME
SYNTAX:	[SA [^] X [^] hhmmss]
PARAMETERS:	hhmmss is the value that sets the Starting Time of the <i>Acquisition Program</i> number X (X= 1 to 5)
REMARKS:	See Section 4.3.2.2
RETURN VALUE:	SA [^] X [^] hhmmss\n\r
ERROR NUMBER:	10



NAME: RS232 SHUTDOWN
SYNTAX: [RPX], [RP]
PARAMETERS: If none: returns the current state of the conditioner RS-232 port (0 or 1)
 If X=0: set RS-232 port always ON
 If X=1: set RS-232 in auto shut-down (default state)
REMARKS: This command enables or disables the automatic feature that turns OFF the RS-232 port when not in use. You should normally never disable this automatic feature. You may disable this feature if you continuously receive non-relevant characters when communicating with the UMI conditioner
RETURN VALUE: RPX\n\r (or)
 RP\n\r
 X\n\r (where X is the current state of the RS-232 port)
ERROR NUMBER: None

NAME: SERIAL NUMBER
SYNTAX: [SN]
PARAMETERS: None, this command returns the serial number of the UMI conditioner
REMARKS:
RETURN VALUE: SN\n\r
 XXXXXX\n\r where XXXXXX is the serial number
ERROR NUMBER: None

NAME: SYSTEM OFF
SYNTAX: [WF]
PARAMETERS: None, this command turns OFF the UMI conditioner
REMARKS: See **SYSTEM ON [WO]** command
RETURN VALUE: WF\n\r
ERROR NUMBER: None

NAME: SYSTEM ON
SYNTAX: [WO]
PARAMETERS: None, this command turns ON the UMI conditioner
REMARKS: See **SYSTEM OFF [WF]** and **SYSTEM SHUTDOWN [WS]** commands
RETURN VALUE: WO\n\r
ERROR NUMBER: None



NAME:	SYSTEM RESET
SYNTAX:	[RF]
PARAMETERS:	None, this command resets the UMI conditioner to its default state
REMARKS:	See Section 3.3.3
RETURN VALUE:	RF\n\r
ERROR NUMBER:	None

NAME:	SYSTEM SHUTDOWN
SYNTAX:	[WS]
PARAMETERS:	None, this command shutdowns the UMI conditioner
REMARKS:	When it is shutdown, the conditioner goes in Wait State. The Wait State keeps the minimum hardware ON for remote communication and turns OFF all other non-necessary hardware (ex. Lamps). The user has still access to all the <i>Remote Control Commands</i> such as, for example, downloading data or programming the conditioner. Use the SYSTEM ON [WO] command to put the conditioner ON again.
RETURN VALUE:	WS\n\r
ERROR NUMBER:	None

NAME:	SYSTEM UNIT
SYNTAX:	[SUX], [SU]
PARAMETERS:	If none: returns the current System of Units (0 or 1) If X=0: set the units to the International System of Units (default state) If X=1: set the units to the Imperial System of Units
REMARKS:	When set to the International System of Units (SI), the conditioner uses the following units: °C for temperature, bar for the pressure, kg for the force or load, mm for the displacement. The equivalent Imperial Units are: °F, psi, lb, in. The strain unit is the micro-strain $\mu\epsilon$, that is 10^{-6} meter/meter or 10^{-6} inch/inch. See Section 3.3.3
RETURN VALUE:	SUX\n\r SU\n\r X\n\r (or) (where X is the current System of Units)
ERROR NUMBER:	None



NAME:	TIME
SYNTAX:	[SThhmm], [ST]
PARAMETERS:	If none: returns the current time of the UMI real-time clock Otherwise: sets the time of the UMI real-time clock, hh =hours and mm = minutes
REMARKS:	See Section 3.3.3
RETURN VALUE:	SThhmm \n\r ST\n\r (or) hhmm \n\r (where hhmm is the UMI current time)
ERROR NUMBER:	10

NAME:	TRIGGER
SYNTAX:	[TSX]
PARAMETERS:	If X=0: deactivates the <i>Acquisition Session</i> or the <i>Acquisition Programs</i> If X=1: activates the <i>Acquisition Session</i> or the <i>Acquisition Programs</i>
REMARKS:	See Section 4.3
RETURN VALUE:	TSX\n\r
ERROR NUMBER:	2

NAME:	VERSION DOWNLOAD
SYNTAX:	[VR]
PARAMETERS:	None, this command returns the EPROM version of the UMI conditioner
REMARKS:	
RETURN VALUE:	VR\n\r VERSION X.XXX\n\r (where X.XXX is the EPROM version)
ERROR NUMBER:	None

NAME:	ZERO DOWNLOAD
SYNTAX:	[#NZD]
PARAMETERS:	None, returns the <i>Gauge Zero</i> value of the <i>Gauge Factor</i> currently assigned to the measuring channel N.
REMARKS:	This function is irrelevant for temperature transducer See Section 3.1.3
RETURN VALUE:	#NZD\n\r XXXXXXX\n\r (where XXXXXXX is the <i>Gauge Zero</i> current value in nm)
ERROR NUMBER:	10, 12



NAME:	ZERO INTERNAL
SYNTAX:	[ZPXXXXXX]
PARAMETERS:	XXXXXX is the value (in internal units) that offsets the transducer currently assigned to the selected channel.
REMARKS:	First, puts the UMI in manual scan by selecting the appropriate <i>Acquisition Mode</i> (ex. Use [TM2] mode). Second, select a channel with the CHANNEL SELECT [CS] command and then proceed with the zero internal command. This function is irrelevant for temperature transducer See Sections 3.1.3 and 3.1.3.2
RETURN VALUE:	ZPXXXXXX\n\r
ERROR NUMBER:	10, 11

NAME:	ZERO PHYSICAL
SYNTAX:	[ZOXXXX.XX]
PARAMETERS:	XXXX.XX is the value (in physical units) that offsets (or zero adjust) the transducer currently assigned to the selected channel.
REMARKS:	First, puts the UMI in manual scan by selecting the appropriate <i>Acquisition Mode</i> (ex. Use [TM2] mode). Second, select a channel with the CHANNEL SELECT [CS] command and then proceed with the command. This function is irrelevant for temperature transducer See Sections 3.1.3 and 3.1.3.2. Use this function to make a zero adjustment as well (send [Z00] command). See section 3.1.3.1
RETURN VALUE:	ZOXXXX.XX\n\r
ERROR NUMBER:	10, 11