

Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	iii
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.1.1 Objetivos Generales.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Estructura de la Memoria.....	2
Capítulo 2: Revisión Bibliográfica y Contextualización.....	3
2.1 Marco Teórico.....	3
2.1.1 Onda sísmica	3
2.1.2 Ondas internas (de cuerpo).....	4
2.1.3 Medio de propagación	5
2.1.4 Dispersión Geométrica	5
2.1.5 Atenuación.....	5
2.1.6 Absorción	5
2.1.7 Reflexión	6
2.1.8 Refracción.....	6
2.1.9 Factor de Atenuación.....	6
2.1.10 Coeficiente de Absorción	6
2.1.11 Filtro de Atenuación Inversa	7
2.1.12 Reflector	7
2.1.13 Frente del Túnel.....	7
2.1.14 Fuente Sísmica Controlada.....	7
2.1.15 Traza.....	8
2.1.16 Matriz de Rotación	8
2.1.17 Amplitud Espectral.....	8
2.1.18 Onda de Choque Aérea.....	8
2.1.19 Filtro Pasa-Bajo	9
2.1.20 Filtro Pasa-Banda	9
2.1.21 Ajuste de Curvas (norma L2)	9
2.1.22 Transformada de Fourier	9
2.1.23 Transformada de Radón.....	9
2.1.24 Principio de Fermat	10
2.1.25 Ruido	10

2.1.26	Jumbo	10
2.2	Nociones básicas de construcción de túneles.....	10
2.2.1	Excavado Convencional	10
2.2.2	Excavado Mecánico.....	12
2.3	Estado del Arte: Pronóstico de Estructuras Geológicas Previo al Avance de la Construcción de un Túnel.....	14
2.3.1	<i>Sonic Softground Probing</i>	14
2.3.2	<i>Tunnel Seismic While Drilling</i>	14
2.3.3	<i>Tunnel Look-Ahead Prediction Using Surface Waves</i>	14
2.3.4	<i>Tunnel Seismic Prediction (TSP)</i>	14
2.4	Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM)	15
Capítulo 3:	Implementación de un Algoritmo de Pre-Procesamiento de Datos Sísmicos	16
3.1	Plataforma de trabajo utilizada	16
3.2	Pasos del Pre-procesamiento	16
3.2.1	Extracción y Caracterización de Datos Sísmicos	16
3.2.2	Modelo Geométrico del Túnel.....	16
3.2.3	Determinación de Distancia Fuente sísmica Controlada-Sensores	18
3.2.4	Normalización de los Sistemas de Referencia Entre los Sensores y el Modelo Geométrico del Túnel.....	19
3.2.5	Corrección de los Sistemas de Referencia de los Sensores Sísmicos.....	20
3.2.6	Determinación de la Ventana Temporal.....	22
3.2.7	Aplicación de un Filtro Pasa-Bajo con Frecuencia de Corte Variable en el Tiempo 22	
3.2.8	Aplicación de un Filtro Pasa-Banda Para Respetar los Rangos Dinámicos del Sensor 23	
3.2.9	Determinación de los Tiempos de Llegada de la Onda P.....	24
3.2.10	Verificación de los Tiempos de Llegada de la Onda P Determinados y Cálculo de Velocidad de Onda P Promedio	24
3.2.11	Alineación de Trazas a Línea de Tendencia de Tiempos de Llegada de Onda P Directa 25	
3.2.12	Normalización de la Energía de Fuentes Sísmicas Controladas.....	25
3.2.13	Estimación del Factor de Atenuación en Medio.....	26
3.2.14	Extracción de las Ondas Reflejadas de los Datos Procesados.....	26
Capítulo 4:	Análisis de los Resultados en Función de los Obtenidos por un <i>Software</i> Comercial 29	
4.1	Descripción de los datos usados	29
4.1.1	Ubicación Geográfica del Túnel y Condiciones de las Pruebas.....	29

4.2	Análisis y Discusión de Resultados	31
4.2.1	Modelo Geométrico del Túnel.....	31
4.2.2	Determinación de Distancia Fuente Sísmica Controlada-Sensores.....	35
4.2.3	Normalización de los Sistemas de Referencia Entre los Sensores y el Modelo Geométrico del Túnel.....	36
4.2.4	Corrección de los Sistemas de Referencia de los Sensores Sísmicos.....	36
4.2.5	Determinación de Ventana Temporal.....	37
4.2.6	Aplicación de un Filtro Pasa-Bajo con Frecuencia de Corte Variable en el Tiempo	37
4.2.7	Aplicación de un Filtro Pasa-Banda Para Respetar los Rangos Dinámicos del Sensor	41
4.2.8	Determinación de los Tiempos de Llegada de la Onda P.....	45
4.2.9	Verificación de los Tiempos de Llegada de la Onda P Determinados y Cálculo de Velocidad de Onda P Promedio	47
4.2.10	Alineación de Trazas a Línea de Tendencia de Tiempos de Llegada de Onda P Directa	48
4.2.11	Normalización de la Energía de Fuentes Sísmicas Controladas.....	49
4.2.12	Estimación del Factor de Atenuación en Medio.....	51
4.2.13	Extracción de las Ondas Reflejadas de los Datos Procesados.....	52
Capítulo 5:	Conclusiones y Recomendaciones	58
5.1	Conclusiones	58
5.2	Recomendaciones	59
Bibliografía.....		60

Índice de Tablas

Tabla 1: Identificadores de los elementos a posicionar en las grillas.....	17
Tabla 2: Tabla de unificación de sistemas de referencia en túnel	19
Tabla 3: Parámetros del filtro pasa-bajo dsp.VariableBandwidthFIRFilter	23
Tabla 4: Parámetros del filtro pasa-banda dsp.VariableBandwidthFIRFilter	24
Tabla 5: Condiciones de la adquisición de datos en terreno.....	30
Tabla 6: Frecuencias de corte del filtro pasa-banda usado en cada prueba.....	41
Tabla 7: Aciertos y fallas al detectar los tiempos de llegada de la onda P directa en la Primera prueba con dos niveles de filtrado distintos	46
Tabla 8: Aciertos y fallas al detectar los tiempos de llegada de la onda P directa	46
Tabla 9: Velocidades promedio de la onda P calculadas para cada sensor.	47
Tabla 10: Comparación de resultados de estimación del factor de atenuación en TSP y en Matlab	52
Tabla 11: Valor de tiempo mínimo utilizado para el filtro en dominio Radón	52
Tabla 12: Parámetros utilizados en la aplicación del filtro de atenuación inversa.....	55

Índice de Figuras

Figura 1: Ejemplo de registro de un sismo. Se ven los tiempos de llegada de las ondas P y S. [1]	3
Figura 2: Vista gráfica del movimiento de las partículas al paso de ondas P (imagen superior) y S (imagen inferior). (Imágenes obtenidas del sitio http://csdelatierra2011profffaustto.blogspot.cl , 2016) [3]	5
Figura 3: Esquema de excavado convencional: 1) Perforado, 2) carga de explosivos, 3) tronadura, 4) ventilación 5) limpieza.	11
Figura 4: Patrón esquemático de las perforaciones hechas en la cara del túnel codificadas en color con respecto a las etapas de detonación: 1° amarillo, 2° rojo, 3° verde y 4° azul. Los círculos blancos denotan agujeros sin carga que sirven para disminuir la formación de tensiones. Las cargas explosivas son cableadas a un detonador externo. (Imagen obtenida de S. Jetschny, « <i>PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.</i> » [11]).	11
Figura 5: Excavado convencional. A la izquierda la perforación para insertar cargas explosivas y a la derecha se ven los escombros que quedan luego de la tronadura. (Imagen obtenida de S. Jetschny, « <i>PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.</i> » [11]).	12
Figura 6: Máquina tuneladora. La rueda tiene un diámetro de 13.3 m. (Imagen obtenida de S. Jetschny, « <i>PhD. Dissertation. Seismic prediction and imaging of geological structures ahead of a tunnel using surface waves.</i> » [11]).	13
Figura 7: Esquema general de una tuneladora con cada una de sus secciones.	13
Figura 8: Esquema del proyecto (Imagen obtenida del sitio http://www.altomaipo.com , 2016) [12]	15
Figura 9: Corte vertical de las grillas del modelo geométrico: La grilla fina queda insertada dentro de la grilla gruesa.	17
Figura 10: Sistemas de referencia de los sensores (en verde) y sistema de referencia general del túnel (en rojo)	19
Figura 11: Corte transversal del túnel mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).	20
Figura 12: Corte longitudinal del túnel mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).	21
Figura 13: Esquema mostrando las desviaciones de los sistemas de referencia de los sensores (en verde) con respecto al general (en rojo).	21
Figura 14: Superposición del plano de construcción del túnel con la vista aérea tomada desde Google Earth. La sección marcada en rosado es el túnel donde se hicieron las pruebas sísmicas.	29
Figura 15: Corte transversal del modelo geométrico del túnel.	31
Figura 16: Vista superior del modelo geométrico del túnel con posiciones de sensores y fuentes sísmicas (V1 0+873.8). Los puntos rojos representan a los sensores: Sensores 1 y 2 en la parte superior, 3 y 4 en la parte inferior. Los puntos verdes representan las 24 fuentes sísmicas controladas.	31
Figura 17: Vista superior del modelo geométrico del túnel con posiciones de sensores y fuentes sísmicas (V1 0+977.7). Los puntos rojos representan a los sensores: Sensores 1 y 2 en la parte superior, 3 y 4 en la parte inferior. Los puntos verdes representan las 24 fuentes sísmicas controladas.	32
Figura 18: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en Matlab (V1 0+873.8). Para mostrar más detalles, se acotaron los límites del eje Y.	33

Figura 19: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en TSP (V1 0+873.8)	33
Figura 20: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en Matlab (V1 0+977.7). Para mostrar más detalles, se acotaron los límites del eje Y.	34
Figura 21: Diferencia de posición de elementos entre túnel real y el modelado en TSP (V1 0+977.7)	34
Figura 22: Diferencia de distancia calculada emisor-fuente sísmica entre Matlab y TSP (V1 0+873.8)	35
Figura 23: Diferencia de distancia calculada emisor-fuente sísmica entre Matlab y TSP (V1 0+977.7)	36
Figura 24: Curva de frecuencia de corte del filtro pasa-bajo variable en el tiempo. (Al graficar se cambió el orden de los ejes para tener concordancia con los espectrogramas de las imágenes siguientes).	37
Figura 25: Espectrograma señales en Matlab previo a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	38
Figura 26: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	38
Figura 27: Espectrograma señales en TSP previo a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	39
Figura 28: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	39
Figura 29: Comparación de una traza previa y posterior a la aplicación del filtro pasa-bajo variable en el tiempo en Matlab y en TSP. Análogo para ambas pruebas.	40
Figura 30: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	42
Figura 31: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+873.8)	42
Figura 32: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8)	43
Figura 33: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8). Frecuencia de corte superior de 4320 Hz.	43
Figura 34: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+873.8). Frecuencia de corte superior de 1500 Hz.	43
Figura 35: Espectrograma señales en Matlab posterior a aplicación del filtro (V1 0+977.7)	44
Figura 36: Espectrograma señales en TSP posterior a aplicación del filtro (V1 0+977.7)	44
Figura 37: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+977.7)	45
Figura 38: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro pasa-banda (V1 0+977.7)	45
Figura 39: Trazas desplazadas coincidiendo con la tendencia calculada (línea azul)	48
Figura 40: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica previo al balance de energía (Matlab V1 0+873.8, sensor 1)	49
Figura 41: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica posterior al balance de energía (Matlab V1 0+873.8, sensor 1)	50
Figura 42: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica previo al balance de energía (TSP V1 0+873.8, sensor 1)	50
Figura 43: Amplitud espectral promedio v/s Distancia Sensor - fuente sísmica posterior al balance de energía (TSP V1 0+873.8, sensor 1)	51
Figura 44: Trazas con ventana temporal marcada (caja roja)	51
Figura 45: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8)	53
Figura 46: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8)	53
Figura 47: Trazas sísmicas antes de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8). Tendencia de las llegadas marcadas con líneas verdes.	54
Figura 48: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro en dominio Radón (V1 0+873.8). Tendencias de las llegadas marcadas con líneas rojas.	54
Figura 49: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en Matlab (V1 0+873.8)	55

Figura 50: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en TSP (V1 0+873.8).	56
Figura 51: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en Matlab (V1 0+977.7).	56
Figura 52: Trazas sísmicas después de aplicar el filtro de atenuación inversa en TSP (V1 0+977.7).	57