

ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes y motivación.....	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Soluciones propuestas.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.4.1 Objetivo general.....	2
1.4.2 Objetivos específicos.....	2
1.5 Alcances.....	2
1.6 Metodología y herramientas utilizadas.....	2
1.7 Resultados esperados.....	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Ventilación.....	4
2.1.1 Tipos de ventilación.....	4
2.1.2 Variables de control de un sistema de ventilación.....	6
2.2 Resistencia al movimiento del aire.....	8
2.2.1 Teorema de Bernoulli.....	8
2.2.2 Ley de Kirchhoff.....	10
2.3 Aire y contaminantes.....	12
2.3.1 Aire.....	13
2.3.2 Gases contaminantes.....	13
2.4 Polvo en suspensión.....	15
2.5 Ley vigente Chile.....	16
2.6 Método sin soporte: Block Caving – Panel Caving.....	16
2.6.1 Ventilación en método Caving.....	18
2.7 Arreglos ortogonales.....	19
2.7.1 Diseño de experimentos mediante arreglo ortogonal.....	19
2.8 Análisis de regresión.....	21
2.8.1 Coeficiente de correlación de Pearson.....	21

2.8.2	Coeficiente de determinación	21
2.8.3	Coeficiente de determinación ajustado	22
2.8.4	Error estándar de estimación	23
2.9	Inteligencia artificial (IA)	23
2.10	Machine Learning (ML)	24
2.10.1	Aprendizaje supervisado.....	25
2.10.2	Aprendizaje no supervisado.....	25
2.11	Deep Learning.....	25
2.11.1	Redes neuronales artificiales	25
3.	METODOLOGÍAS.....	32
3.1	Datos	32
3.2	Software	32
3.2.1	AutoCAD.....	32
3.2.2	VentSim.....	32
3.2.3	IBM SPSS Statistics	33
3.2.4	Spyder (The <i>Scientific Python Development Environment</i>)	33
3.3	Procedimiento	34
4.	DESARROLLO.....	36
4.1	Características de la Mina y Sistema de ventilación.....	36
4.1.1	Nivel de hundimiento	38
4.1.2	Subnivel de inyección.....	38
4.1.3	Subnivel de extracción.....	39
4.2	Corrección de layout de la mina	39
4.2.1	Nivel de hundimiento	40
4.2.2	Nivel de ventilación.....	41
4.3	Arreglo ortogonal.....	42
4.4	Temporalidad	44
4.5	Puntos de estudio	45
4.6	Análisis del modelo	47
4.7	Entrenamiento de redes neuronales	48
4.7.1	Análisis y resultados de entrenamiento	49

4.8	Modelo de control optimal.....	55
4.8.1	Análisis y resultado de control optimal	59
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
	REFERENCIAS	66
	APÉNDICE A	70
	APÉNDICE B.....	76
	APÉNDICE C	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Ventilación natural (SERNAGEOMIN, 2015).	5
Figura 2.2 Sistemas de ventilación auxiliar (SERNAGEOMIN, 2015).	6
Figura 2.3 Compuerta para ventilación mineras subterránea (Nergeco, 2017).	6
Figura 2.4 Ventilador centrifugo (Zitrón, 2010).	7
Figura 2.5 Ventiladores axiales (Pentagono Servicios Generales, 2020).	7
Figura 2.6 Sistema de flujo de fluido con las relaciones energéticas (Hartman y otros, 1997).	8
Figura 2.7 Primera ley de Kirchhoff (Hartman y otros, 1997).	10
Figura 2.8 Segunda ley de Kirchhoff (Hartman y otros, 1997).	10
Figura 2.9 Esquema de circuito en serie (Hartman y otros, 1997).	11
Figura 2.10 Esquema de circuito en paralelo (Hartman y otros, 1997).	12
Figura 2.11 Infraestructura típica de una mina explotada por panel <i>Caving</i> con hundimiento convencional (Darling, 2011).	17
Figura 2.12 Sistema de ventilación en método de explotación <i>Caving</i> (McPherson, 1993 en Hernández, 2019).	18
Figura 2.13 Diagrama de relación entre inteligencia artificial, <i>Machine Learning</i> y <i>Deep Learning</i> (Medium, 2018).	24
Figura 2.14 Neurona biológica con sus principales partes (Olivera, 2019).	26
Figura 2.15 Red neuronal artificial, perceptrón multicapa (Innovation, 2019).	27
Figura 2.16 Gráfico de función sigmoide (Ponce, 2021).	28
Figura 2.17 Gráfico de función tangente hiperbólica (Ponce, 2021).	28
Figura 2.18 Gráfico de función tangente hiperbólica (Ponce, 2021).	29
Figura 3.1 Esquema de metodología (Elaboración propia).	35

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Composición del aire seco (Bolz & Tuve, 1973 en Hernández, 2019).	13
Tabla 2.2 Clasificación de los gases (SERNAGEOMIN, 2015).	13
Tabla 2.3. Matrices ortogonales estándar (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).	20
Tabla 2.4. Ejemplo de un arreglo ortogonal L_82^7 (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).	20
Tabla 4.1 Cota de los niveles de la mina.	37
Tabla 4.2 Datos de ventiladores principales disponibles.....	37
Tabla 4.3 Datos de ventiladores auxiliares disponibles.....	37
Tabla 4.4 Datos de ventiladores de inyección del nivel de hundimiento.	41
Tabla 4.5 Datos de ventiladores de extracción del nivel de hundimiento.	42
Tabla 4.6 Términos para las variables utilizadas.....	43
Tabla 4.7 Escenarios generados del arreglo ortogonal.	44
Tabla 4.8 Ejemplo de escenarios adiciones generados a partir del escenario original N°1. 45	
Tabla 4.9 Caudales simulados de escenarios adicionalmente generados a partir del escenario original N°1.	46
Tabla 4.10 Estadística de los modelos analizados.....	47
Tabla 4.11 Valores de caudales de prueba y predicción de la base de datos original.	51
Tabla 4.12 Ejemplo de escenarios adiciones generados a partir del escenario original N°1 con datos de caudales.	52
Tabla 4.13 Valores de caudales de prueba y predicción, base de datos modificada.	54
Tabla 4.14 Error cuadrático medio (MSE) de la base original y modificada del punto centro.	55
Tabla 4.15 Cálculo caudal requerido.....	58
Tabla 4.16 Escenarios inicial para inicial código principal.....	58
Tabla 4.17 Resumen de resultado del modelo de control optimal de los puntos.	61
Tabla A.1 Escenarios adiciones generados.....	70