

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1	Hipótesis	3
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Contribuciones	4
1.4	Alcance	4
1.5	Publicaciones	4
1.5.1	Journal Publications	4
1.5.2	Conference Publications	5
1.6	Estructura de la Tesis	5
2.	Estado del Arte	6
2.1	Estabilidad de frecuencia	6
2.1.1	Desbalance de potencia, inercia sistémica, y RoCoF	8
2.1.2	Frecuencia nadir	13
2.1.3	Governor ramp-rate	13
2.1.4	Control Primario de Frecuencia	14
2.1.5	Headroom	15
2.2	Efectos de la baja inercia en la estabilidad de frecuencia de los SEP	16
2.3	Importancia y desafíos de los estudios de estabilidad de frecuencia en SEP reales	17
2.4	Máquinas de Aprendizaje aplicadas al análisis de estabilidad de frecuencia	19
2.4.1	Inteligencia Artificial, Máquinas de Aprendizaje y Deep Learning	20
2.4.2	Clasificación de los algoritmos utilizados en las MA	22
2.4.3	Algoritmos de MA utilizados en estudios estabilidad de frecuencia	25
2.5	Análisis del estado del arte referente a la aplicación de MA para el análisis de estabilidad de frecuencia	30
3.	Metodología	35
3.1	Cálculo de características relevantes	36
3.2	Algoritmo para el cálculo de los indicadores que caracterizan la respuesta primaria en frecuencia	36
3.3	Identificación de características relevantes	38
3.4	Diseño del filtro	42
3.5	Cluster y selección PO representativos	44
4.	Análisis de Resultados	46
4.1	Caso de Estudio	46
4.2	Identificación de los PO con peor desempeño	47
4.3	Selección de PO representativos	50
4.4	Discusión	54
5.	Aplicación de los desarrollos de esta tesis en el proyecto Fondef IDeA: “Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo en línea de la seguridad dinámica del sistema eléctrico” ...	55
5.1	Contexto del proyecto FONDEF IDeA: Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo en línea de la seguridad dinámica del sistema eléctrico	55
5.1.1	Metodología del proyecto Fondef IDeA	57
5.2	Desarrollos realizados en el marco de esta tesis que serán utilizados en el proyecto Fondef IDeA	57
5.3	Comentarios del Capítulo V	63
6.	Conclusiones y Trabajos Futuros	65
6.1	Conclusiones	65
6.2	Trabajos Futuros	66

Bibliografía.....	67
ANEXOS.....	71
Anexo A: Lista de Acrónimos.....	71
Anexo B: Resultados con diferentes objetivos de filtro aplicados al ex - SING.....	72
Anexo C: Objetivos y producto final del proyecto: Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo en línea de la seguridad dinámica del sistema eléctrico.....	76

Índice de Figuras

Figura 1 Respuesta en frecuencia, conceptos y definiciones (recomendaciones de ENTSO-E).....	7
Figura 2 Valores de Inercia característicos de centrales hidráulicas y turbinas a vapor.....	11
Figura 3 Valores de Inercia característicos de centrales nucleares y turbinas de combustión.....	12
Figura 4 Valores de Inercia característicos de centrales que forman parte del SEN (Chile).....	13
Figura 5 Respuesta al escalón (regulador de velocidad).....	14
Figura 6 Respuesta dinámica del regulador de velocidad de un GS.....	15
Figura 7 Clasificación de la IA.....	20
Figura 8 Clasificación general de los algoritmos utilizados en MA.....	21
Figura 9 Diferencias entre MA y Deep Learning.....	22
Figura 10 Clasificación de algoritmos utilizados en las MA.....	23
Figura 11 Identificación de 3 grupos utilizando k-means.....	25
Figura 12 Función Linear Logistic Regression.....	26
Figura 13 Tipos de clusters jerárquicos en función del grado de proximidad.....	27
Figura 14 Clasificador usando SVM.....	27
Figura 15 Clasificador utilizando DTs.....	28
Figura 16 Entrenamiento de diversos clasificadores.....	28
Figura 17 Predicciones basadas en el método del más votado.....	28
Figura 18 Funcionamiento del algoritmo RF.....	29
Figura 19 Estructura de una Red Neuronal de una sola capa.....	30
Figura 20 Estructura de un algoritmo basado en ELM.....	30
Figura 21 Metodología Propuesta.....	35
Figura 22 Sistema de prueba IEEE de 14 barras.....	40
Figura 23 Metodología para el desarrollo del filtro.....	41
Figura 24 Función de distribución acumulada de la fNAD para todos los PO del sistema de prueba IEEE de 14 barras.....	41
Figura 25 Diseño del Filtro.....	43
Figura 26 Histograma con los resultados del filtro para identificar el 20% de los PO con peor desempeño: a) verdaderos positivos (color verde) y falsos positivos (color rojo). b) verdaderos negativos (color verde) y falsos negativos (color rojo).....	44
Figura 27 ex-Sistema Interconectado del Norte Grande (ex-SING).....	46
Figura 28 Resultado de 3 características relevantes junto con el desempeño en frecuencia del sistema ex-SING obtenidos utilizando TDS.....	47
Figura 29 Histograma con los resultados del filtro para identificar el 20% de los PO en el ex - SING con peor desempeño: a) verdaderos positivos (color verde) y falsos positivos (color rojo). b) Verdaderos negativos (color verde) y falsos negativos (color rojo).....	48
Figura 30 Selección de puntos representativos utilizando un filtro para identificar el 20% de los PO con peor desempeño.....	49
Figura 31 Porcentaje de las condiciones de operación (horas) y contingencias con peor desempeño identificadas correctamente por diferentes filtros aplicados al ex - SING.....	49
Figura 32 Ejemplo ilustrativo para seleccionar 30 PO representativos usando un filtro diseñado para identificar el 20% de los puntos PO con peor desempeño.....	50
Figura 33 PO representativos usando un filtro diseñado para identificar el 20% de los puntos PO con peor desempeño.....	51
Figura 34 Representación del error obtenido con diferente número de clusters. Las líneas continuas representan el error obtenido para PO identificados con el peor desempeño (tanto correctos como incorrectos), mientras que las líneas discontinuas representan el error para los PO reales con el peor desempeño.....	52

<i>Figura 35 Error de representación obtenido para los PO reales con peor desempeño para diferente número de clusters. Las líneas continuas representan el error obtenido usando el filtro propuesto, mientras que las líneas discontinuas representan el error usando un filtro ideal, sin error de clasificación</i>	53
<i>Figura 36 Resultados obtenidos para representar el 1% de los peores PO usando 20 clusters con varios filtros como objetivo</i>	53
<i>Figura 37 Metodología proyecto Fondef IDeA</i>	57
<i>Figura 38 Metodología Etapa 1 Fondef IDeA</i>	59
<i>Figura 39 Clustering Process</i>	61
<i>Figura 40 Flujograma automatización simulaciones dinámicas (DPL)</i>	63

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Resumen valores de Inercia H [s] centrales hidráulicas y turbinas a vapor</i>	11
<i>Tabla 2 Resumen valores de Inercia H [s] centrales nucleares y turbinas de combustión</i>	12
<i>Tabla 3 Resumen valores de Inercia H [s] centrales que forman parte del SEN (Chile)</i>	13
<i>Tabla 4 Características Candidatas</i>	36
<i>Tabla 5 Ranking de Características del sistema de prueba IEEE de 14 barras</i>	42
<i>Tabla 6 Desempeño del Filtro</i>	44
<i>Tabla 7 Desempeño de la implementación de filtros con diferentes objetivos en el ex - SING</i>	48