

# Tabla de contenido

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Capítulo 1. Introducción.</b>                                                   | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Motivación.</b>                                                            | <b>1</b>  |
| <b>1.2. Objetivos.</b>                                                             | <b>2</b>  |
| 1.2.1. Objetivo general.                                                           | 2         |
| 1.2.2. Objetivos específicos.                                                      | 2         |
| <b>1.3. Hipótesis.</b>                                                             | <b>2</b>  |
| <b>1.4. Metodología.</b>                                                           | <b>3</b>  |
| <b>1.5. Estructura de trabajo.</b>                                                 | <b>4</b>  |
| <b>Capítulo 2. Antecedentes y Procedimientos.</b>                                  | <b>6</b>  |
| <b>2.1. Micro-redes.</b>                                                           | <b>6</b>  |
| 2.1.1. Definición.                                                                 | 6         |
| 2.1.2. Tipos de micro-redes.                                                       | 7         |
| 2.1.3. Planificación de micro-redes.                                               | 9         |
| 2.1.4. Caracterización de incertidumbre de los recursos renovables y carga.        | 11        |
| <b>2.2. Modelamiento de sistemas.</b>                                              | <b>12</b> |
| 2.2.1. Modelación lineal.                                                          | 13        |
| 2.2.2. Modelación difusa de Takagi & Sugeno.                                       | 14        |
| <b>2.3. Identificación de sistemas.</b>                                            | <b>18</b> |
| 2.3.1. Obtención de datos de identificación.                                       | 20        |
| 2.3.2. Selección de variables relevantes.                                          | 21        |
| 2.3.3. Optimización de la estructura.                                              | 23        |
| 2.3.4. Identificación de los parámetros de las premisas.                           | 24        |
| 2.3.5. Identificación de los parámetros de las consecuencias.                      | 26        |
| 2.3.6. Análisis de estabilidad.                                                    | 28        |
| <b>2.4. Estabilidad de Modelos Difusos.</b>                                        | <b>28</b> |
| 2.4.1. Estabilidad según Lyapunov.                                                 | 29        |
| 2.4.2. Estabilidad de modelos difusos discretos.                                   | 29        |
| 2.4.3. Metodología para análisis de estabilidad de modelos difusos.                | 30        |
| <b>2.5. Modelos de intervalos.</b>                                                 | <b>32</b> |
| 2.5.1. Generalidades.                                                              | 32        |
| 2.5.2. Método de la covarianza.                                                    | 33        |
| 2.5.3. Índices de evaluación de intervalos.                                        | 36        |
| <b>2.6. Self-Organizing Map.</b>                                                   | <b>37</b> |
| 2.6.1. Definición.                                                                 | 37        |
| 2.6.2. Proceso de entrenamiento.                                                   | 38        |
| <b>2.7. Generación de perfiles aleatorios.</b>                                     | <b>40</b> |
| 2.7.1. Cadenas de Markov.                                                          | 40        |
| 2.7.2. Metodología para generación de perfiles.                                    | 42        |
| <b>2.8. Discusión.</b>                                                             | <b>47</b> |
| <b>Capítulo 3. Caracterización de los recursos renovables y demanda eléctrica.</b> | <b>48</b> |

|                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3.1. Caso de Estudio: Comunidad de José Painecura Hueñalihuen.</b>          | <b>48</b>  |
| <b>3.2. Condiciones climáticas y geográficas.</b>                              | <b>49</b>  |
| <b>3.3. Recursos energéticos.</b>                                              | <b>52</b>  |
| 3.3.1. Recurso eólico.                                                         | 53         |
| 3.3.2. Recurso solar.                                                          | 55         |
| <b>3.4. Modelo del recurso eólico.</b>                                         | <b>56</b>  |
| 3.4.1. Modelación lineal y modelación difusa de Takagi-Sugeno.                 | 56         |
| 3.4.2. Inclusión de incertidumbre mediante intervalo de confianza.             | 60         |
| <b>3.5. Modelo del recurso solar.</b>                                          | <b>62</b>  |
| 3.5.1. Modelación lineal y modelación difusa de Takagi-Sugeno.                 | 62         |
| 3.5.2. Inclusión de incertidumbre mediante intervalo de confianza.             | 67         |
| <b>3.6. Estimación y modelo de demanda eléctrica.</b>                          | <b>69</b>  |
| 3.6.1. Clasificación de hogares.                                               | 69         |
| 3.6.2. Variabilidad en perfiles de consumo.                                    | 74         |
| 3.6.3. Perfil de demanda comunitaria.                                          | 78         |
| 3.6.4. Modelación lineal y modelación difusa de Takagi-Sugeno.                 | 82         |
| 3.6.5. Inclusión de incertidumbre mediante intervalo de confianza.             | 85         |
| <b>3.7. Discusión.</b>                                                         | <b>87</b>  |
| <b>Capítulo 4. Diseño de la micro-red.</b>                                     | <b>89</b>  |
| <b>4.1. Planificación de micro-redes.</b>                                      | <b>89</b>  |
| 4.1.1. Metodología propuesta.                                                  | 89         |
| 4.1.2. Software de dimensionamiento de micro-redes: HOMER.                     | 92         |
| <b>4.2. Condiciones y parámetros de diseño.</b>                                | <b>96</b>  |
| 4.2.1. Consideraciones generales.                                              | 96         |
| 4.2.2. Características técnicas y económicas de las tecnologías de generación. | 99         |
| 4.2.3. Demanda adicional por desarrollo productivo.                            | 104        |
| <b>4.3. Resultados.</b>                                                        | <b>110</b> |
| 4.3.1. Resultados de optimización.                                             | 110        |
| 4.3.2. Resultados de análisis de sensibilidad.                                 | 114        |
| 4.3.3. Operación del sistema.                                                  | 115        |
| <b>4.4. Discusión.</b>                                                         | <b>117</b> |
| <b>Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro.</b>                              | <b>118</b> |
| <b>5.1. Conclusiones generales.</b>                                            | <b>118</b> |
| <b>5.2. Líneas de investigación futuras.</b>                                   | <b>119</b> |
| <b>5.3. Publicaciones generadas.</b>                                           | <b>119</b> |
| <b>Bibliografía.</b>                                                           | <b>120</b> |
| <b>Anexos.</b>                                                                 | <b>130</b> |
| <b>Anexo A. Algoritmos.</b>                                                    | <b>130</b> |
| A.1. Algoritmo genético.                                                       | 130        |
| A.2. Algoritmo <i>k-means</i> .                                                | 131        |
| <b>Anexo B. Resultados en identificación de modelos.</b>                       | <b>132</b> |

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| B.1. Resultados en análisis de estabilidad.                    | 132        |
| B.2. Parámetros de las premisas de los modelos identificados.  | 134        |
| <b>Anexo C. Resultados en simulación de demanda eléctrica.</b> | <b>135</b> |
| C.1. Distribución de frecuencias por clase.                    | 135        |
| C.2. Índices estadísticos por clase.                           | 137        |
| C.3. Parámetros de las cadenas de Markov.                      | 139        |
| <b>Anexo D. Dimensionamiento de sistema de riego.</b>          | <b>142</b> |
| D.1. Serie de suelo.                                           | 142        |
| D.2. Requerimientos de riego.                                  | 143        |

# Índice de figuras

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1: Estructura de la metodología de trabajo.                                                                             | 3  |
| Figura 2.1: Arquitectura de una micro-red.                                                                                       | 7  |
| Figura 2.2: $\mu$ grid en Sendai, Japón [22].                                                                                    | 8  |
| Figura 2.3: Mgrid en Borrego Springs, California [23].                                                                           | 8  |
| Figura 2.4: Rgrid en Huatacondo, Chile [24].                                                                                     | 9  |
| Figura 2.5: Aproximación lineal con modelo de T&S.                                                                               | 17 |
| Figura 2.6: Proceso de identificación de sistemas.                                                                               | 19 |
| Figura 2.7: Proyección de 3 clusters en 2 variables de entrada [67].                                                             | 26 |
| Figura 2.8: Metodología para el análisis de estabilidad de modelos difusos de T&S [55].                                          | 31 |
| Figura 2.9: Diagrama de entradas y salidas de SOM.                                                                               | 38 |
| Figura 2.10: Proceso de entrenamiento SOM.                                                                                       | 39 |
| Figura 2.11: SOM entrenado.                                                                                                      | 40 |
| Figura 2.12: Procedimiento para generación de perfiles aleatorios.                                                               | 42 |
| Figura 2.13: Esquema de generación de datos con cadenas de Markov [88].                                                          | 46 |
| Figura 3.1: Ubicación geográfica de la comunidad de José Paineicura Hueñalihuen [89].                                            | 48 |
| Figura 3.2: Diagrama climático - Estación meteorológica de Puerto Saavedra [92].                                                 | 50 |
| Figura 3.3: Regiones del mundo con clima templado lluvioso [92].                                                                 | 51 |
| Figura 3.4: Condiciones geográficas de la comunidad de José Paineicura Hueñalihuen. (a) Mapa de alturas; (b) Mapa de pendientes. | 52 |
| Figura 3.5: Potencial eólico en José Paineicura Hueñalihuen.                                                                     | 54 |
| Figura 3.6: Velocidad promedio del viento en José Paineicura Hueñalihuen.                                                        | 54 |
| Figura 3.7: Potencial solar en José Paineicura Hueñalihuen.                                                                      | 55 |
| Figura 3.8: Insolación diaria en José Paineicura Huenalihuen.                                                                    | 56 |
| Figura 3.9: Funciones de pertenencia del recurso eólico.                                                                         | 58 |
| Figura 3.10: Desempeño de los modelos del recurso eólico a 24 pasos.                                                             | 59 |
| Figura 3.11: Intervalos lineales del recurso eólico a 1 paso.                                                                    | 60 |
| Figura 3.12: Intervalos lineales del recurso eólico a 24 pasos.                                                                  | 61 |
| Figura 3.13: Funciones de pertenencia del recurso solar.                                                                         | 64 |
| Figura 3.14: Desempeño de los modelos del recurso solar a 24 pasos.                                                              | 66 |
| Figura 3.15: Intervalos lineales del recurso solar a 1 paso.                                                                     | 67 |
| Figura 3.16: Intervalos lineales del recurso solar a 24 pasos.                                                                   | 68 |
| Figura 3.17: Agrupación de hogares obtenidas a través del algoritmo SOM.                                                         | 71 |
| Figura 3.18: Perfiles de carga promedio por clase.                                                                               | 73 |
| Figura 3.19: Diferenciación del perfil de carga promedio de la clase Pangí para distintos días de la semana.                     | 74 |
| Figura 3.20: Demanda eléctrica por clase en un día tipo.                                                                         | 76 |
| Figura 3.21: Demanda eléctrica promedio por clase.                                                                               | 77 |
| Figura 3.22: Diferenciación del perfil de carga promedio de la Escuela para distintos días de la semana.                         | 79 |
| Figura 3.23: Consumo promedio mensual.                                                                                           | 79 |
| Figura 3.24: Perfil de carga de la comunidad de 4 días de simulación.                                                            | 80 |
| Figura 3.25: Perfil de carga promedio de la comunidad.                                                                           | 81 |
| Figura 3.26: Perfil de carga de la comunidad de un año de simulación.                                                            | 81 |
| Figura 3.27: Funciones de pertenencia de la demanda eléctrica.                                                                   | 83 |
| Figura 3.28: Desempeño de los modelos de demanda eléctrica a 24 pasos.                                                           | 84 |
| Figura 3.29: Intervalos lineales de la demanda eléctrica a 1 paso.                                                               | 86 |
| Figura 3.30: Intervalos lineales de la demanda eléctrica a 24 pasos.                                                             | 86 |
| Figura 4.1: Diagrama del modelo de batería cinética.                                                                             | 95 |
| Figura 4.2: Diagrama esquemático de la micro-red.                                                                                | 97 |
| Figura 4.3: Temperatura promedio en Hueñalihuen.                                                                                 | 98 |
| Figura 4.4: Consumo histórico bimestral promedio.                                                                                | 98 |
| Figura 4.5: Confiabilidad de la red principal.                                                                                   | 99 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.6: Curva de potencia de aerogeneradores de 3.5 [kW] y 10 [kW]. | 100 |
| Figura 4.7: Precios mayoristas históricos del diésel.                   | 104 |
| Figura 4.8: Evapotranspiración potencial en la localidad de Nehuentue.  | 106 |
| Figura 4.9: Precipitación en la estación de Puerto Saavedra.            | 108 |
| Figura 4.10: Demanda energética por desarrollo productivo.              | 109 |
| Figura 4.11: Producción mensual promedio de energía.                    | 113 |
| Figura 4.12: Resumen de costos del proyecto.                            | 114 |
| Figura 4.13: Producción anual del sistema fotovoltaico.                 | 116 |
| Figura 4.14: Producción anual del generador diésel.                     | 116 |
| Figura 4.15: Compras anuales desde la red.                              | 117 |
| Figura 4.16: Ventas anuales hacia la red.                               | 117 |
| Figura A.1: Histogramas de variables por clase.                         | 137 |
| Figura A.2: Series de suelo - Región de la Araucanía [131].             | 142 |

## Índice de tablas

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 3.1: Medidas de error de los modelos del recurso eólico a 1 paso.                | 59  |
| Tabla 3.2: Medidas de error de los modelos del recurso eólico a 24 pasos.              | 59  |
| Tabla 3.3: Desempeño de los modelos de intervalos lineales del recurso eólico.         | 61  |
| Tabla 3.4: Medidas de error de los modelos del recurso solar a 1 paso.                 | 66  |
| Tabla 3.5: Medidas de error de los modelos del recurso solar a 24 pasos.               | 66  |
| Tabla 3.6: Desempeño de los modelos de intervalos lineales del recurso solar.          | 68  |
| Tabla 3.7: Variables relevantes para la caracterización de consumo por hogar.          | 70  |
| Tabla 3.8: Resumen de clasificación de hogares.                                        | 72  |
| Tabla 3.9: Registro de datos por clase.                                                | 73  |
| Tabla 3.10: Características de grupo de datos de consumo por clase.                    | 75  |
| Tabla 3.11: Medida de error de la demanda eléctrica simulada por clase.                | 77  |
| Tabla 3.12: Medidas de error de los modelos de demanda eléctrica a 1 paso.             | 85  |
| Tabla 3.13: Medidas de error de los modelos de demanda eléctrica a 24 pasos.           | 85  |
| Tabla 3.14: Desempeño de los modelos de intervalos lineales de la demanda eléctrica.   | 87  |
| Tabla 4.1: Requerimientos de cultivo.                                                  | 105 |
| Tabla 4.2: Coeficiente de cultivo de la papa, trigo y avena.                           | 106 |
| Tabla 4.3: Propiedades del suelo de la asociación Nahuelbuta.                          | 107 |
| Tabla 4.4: Resultados del sistema de riego para desarrollo productivo.                 | 109 |
| Tabla 4.5: Diseño de micro-redes bajo distintos escenarios.                            | 111 |
| Tabla 4.6: Costos asociados a micro-redes bajo distintos escenarios.                   | 111 |
| Tabla 4.7: Resultados de operación de micro-redes bajo distintos escenarios.           | 112 |
| Tabla 4.8: Sensibilidad en los costos asociados a la micro-red.                        | 115 |
| Tabla A.1: Norma de los polos en modelos del recurso eólico.                           | 132 |
| Tabla A.2: Norma de los polos en modelos del recurso solar.                            | 133 |
| Tabla A.3: Norma de los polos en modelos de demanda eléctrica.                         | 133 |
| Tabla A.4: Parámetros de las premisas del modelo difuso de T&S del recurso eólico.     | 134 |
| Tabla A.5: Parámetros de las premisas del modelo difuso de T&S del recurso solar.      | 134 |
| Tabla A.6: Parámetros de las premisas del modelo difuso de T&S de la demanda eléctrica | 135 |
| Tabla A.7: Índices estadísticos de la clase Nawel.                                     | 137 |
| Tabla A.8: Índices estadísticos de la clase Kura.                                      | 138 |
| Tabla A.9: Índices estadísticos de la clase Lafken.                                    | 138 |
| Tabla A.10: Índices estadísticos de la clase Guru.                                     | 138 |
| Tabla A.11: Índices estadísticos de la clase Pangi.                                    | 139 |
| Tabla A.12: Requerimientos de riego del cultivo de papa de primera temporada.          | 144 |
| Tabla A.13: Requerimientos de riego del cultivo de papa de segunda temporada.          | 145 |
| Tabla A.14: Requerimientos de riego del cultivo de trigo y avena.                      | 146 |

## Acrónimos y Siglas

AIC : (*Akaike's Information Criterion*) Índice de Información de Akaike

AR : Auto-Regresivo

CoE : (*Cost of Energy*) Costo de la Energía

CP : (*Confidence Probability*) Probabilidad de Confianza

CPN : Costo Presente Neto

DER : (*Distributed Energy Resources*) Recursos Energéticos Distribuidos

EMS : (*Energy Management System*) Sistema de Gestión de Energía

ERNC : Energías Renovables No Convencionales

MAE : (*Mean Absolute Error*) Error Medio Absoluto

MF : (*Membership Function*) Función de Pertenencia

MTE : Matriz de Transición de Estados

NAW : (*Normalized Average Width*) Ancho Promedio Normalizado

O&M : Operación y Mantenimiento

RMSE : (*Root Mean Square Error*) Error Cuadrático Medio

SEP : Sistema Eléctrico de Potencia

SIG : Sistema de Información Geográfica

SOM : (*Self-Organizing Map*) Mapa Auto-Organizado

T&S : Takagi & Sugeno