

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO ELÉCTRICO Y CONTROL
ELECTRÓNICO DE MICROCENTRAL
HIDROELÉCTRICA AISLADA***

DOCUMENTO 1 – ÍNDICE GENERAL

Alumno: Rozas Holgado, Iñigo

Director: Sainz de Murieta Mangado, Joseba

Curso: 2017-2018

Fecha: 28/06/2018

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Justificación y alcance.....	2
2	Contexto y antecedentes	3
2.1	Antecedentes.....	3
3	Beneficios que aporta el trabajo	5
4	Marco teórico	6
4.1	Introducción.....	6
4.2	Necesidades energéticas	7
4.3	Evaluación del recurso hidroenergético	9
4.3.1	Medición del salto	9
4.3.2	Medición de caudal.....	10
4.3.3	Cálculo de la potencia hidroeléctrica	11
4.4	Obras civiles.....	12
4.4.1	Introducción	12
4.4.2	Esquema general de una microcentral hidráulica.....	14
4.4.3	Captación de agua	15
4.4.4	Aliviaderos.....	15
4.4.5	Desarenadores y cámaras de carga	16
4.4.6	Canales	16
4.4.7	Tuberías de presión	17
4.5	Turbinas hidráulicas.....	19
4.5.1	Elementos fundamentales.....	19
4.5.2	Clasificación fundamental	19
4.5.3	Tipos de turbinas más usadas en microcentrales.....	20
4.5.4	Comparativa de características y selección de turbinas.....	23
4.6	Transmisión de potencia mecánica.....	25
4.6.1	Elementos de un sistema de transmisión	25
4.6.2	Tipos de transmisiones.....	26
4.7	Generadores.....	27

4.7.1 Componentes.....	27
4.7.2 Generador Síncrono.....	28
4.7.3 Generador Asíncrono	36
4.8 Reguladores de velocidad.....	38
4.8.1 Regulador manual	38
4.8.2 Regulador hidráulico automático.....	39
4.8.3 Regulador eléctrico-electrónico	39
4.8.4 Regulador electrónico de carga	40
4.8.5 Regulador mixto.....	41
4.8.6 Comparativa entre los distintos sistemas.....	41
4.9 Regulador electrónico de carga (ELC).....	42
4.9.1 Tipos de regulación	42
4.9.2 Control de la conmutación	45
4.9.3 Control de voltaje, de intensidad o de frecuencia	46
4.9.4 Control PWM	46
4.10 Cuarto de máquinas y líneas de distribución	48
4.10.1 Instrumentos de medida.....	48
4.10.2 Corte y seccionamiento.....	48
4.9.3 Relés de protección.....	51
4.9.4 Cuadros de distribución.....	52
4.9.5 Otras protecciones	53
4.9.6 Cálculos en redes de distribución	53
5 Diseño de la microcentral hidroeléctrica teórica.....	56
5.1 Introducción.....	56
5.2 Demanda eléctrica.....	56
5.3 Evaluación del recurso hidroenergético	57
5.3.1 Medición del salto	57
5.3.2 Medición de caudal.....	58
5.3.3 Cálculo de la potencia neta.....	58
5.4 Obras civiles.....	59
5.4.1 Esquema general.....	59
5.4.2 Captación de agua	60
5.4.3 Aliviaderos.....	61

5.4.4 Cámara de carga	61
5.4.5 Tubería de presión	61
5.5 Turbina Banki y transmisión de potencia	61
5.5.1 Requisitos principales.....	62
5.5.2 Justificación	63
5.6 Transmisión de la potencia mecánica y elementos mecánicos	63
5.7 Generador síncrono.....	64
5.7.1 Generador síncrono monofásico.....	64
5.7.2 Generador síncrono trifásico	66
5.8 ELC monofásico.....	72
5.8.1 Diseño básico.....	72
5.8.2 Determinación de la carga secundaria	72
5.8.3 Sistema de control de intensidad	73
5.8.4 Configuración inicial en Arduino.....	74
5.8.5 Diseño de la unidad de control	79
5.8.6 Diseño de la unidad de potencia	87
5.8.7 Programa de control con Arduino.....	88
5.9 ELC trifásico con una carga por fase.....	92
5.9.1 Diseño básico.....	92
5.9.2 Determinación de la carga secundaria	92
5.9.3 Determinación del sistema de control de intensidades.....	92
5.9.4 Configuración inicial en Arduino.....	93
5.9.5 Diseño de la unidad de control	95
5.9.6 Diseño de la unidad de potencia	98
5.9.7 Programa de control con Arduino	99
5.10 ELC trifásico con una carga para las tres fases.	102
5.10.1 Diseño básico	102
5.10.2 Control de la tensión por fase	102
5.10.3 Determinación de la carga secundaria y el rectificador.....	104
5.10.4 Determinación del sistema de control de intensidades.....	105
5.10.5 Configuración inicial en Arduino	105
5.10.6 Diseño de la unidad de control.....	106
5.10.7 Diseño de la unidad de potencia.....	108

5.10.8 Programa de control con Arduino.....	109
5.11 Cuarto de máquinas.....	112
5.11.1 Obra Civil.....	112
5.11.2 Elementos de medida.....	112
5.11.3 Cables y elementos de protección.....	113
5.11.4 Puesta a tierra.....	115
5.12 Transporte y distribución de la energía.....	116
5.12.1 Acometida aérea.....	117
5.12.2 Línea general de alimentación (LGA) y caja general de protección (CGP).....	118
5.12.3 Líneas de enlace e iluminación auxiliar.....	119
5.12.4 Derivaciones individuales.....	120
5.13 Diseño de la Maqueta demostrativa.....	125
5.13.1 Explicación básica de la maqueta.....	125
5.13.2 Turbina escogida y montaje.....	126
5.13.4 Bomba.....	129
5.13.5 Generador y variador de frecuencia.....	129
6 Resultados.....	132
6.1 Descripción de resultados.....	132
6.1.1 Simulación ELC caso monofásico.....	132
6.1.2 Simulación ELC caso trifásico sin rectificador.....	140
6.1.3 Simulación ELC caso trifásico con rectificador.....	141
6.1.4 Maqueta demostrativa.....	143
6.2 Conclusiones.....	144
6.2.1 Obra civil y turbina.....	144
6.2.2 ELC y Generador.....	144
6.2.3 Distribución eléctrica.....	145
6.2.4 Maqueta demostrativa.....	145
6.2.5 Conclusión final.....	146
6.3 Líneas de desarrollo futuras.....	146
7 Cálculos.....	147
7.1 Cálculos ELC.....	147
7.1.1 Caso monofásico.....	147
7.1.2 Caso trifásico sin rectificador.....	152

7.1.3 Caso trifásico con rectificador	153
8 Metodología seguida	155
8.1 Fases y tareas	155
8.2 Procedimientos	156
8.3 Equipos y programas	157
8.4 Diagrama de Gantt/cronograma	158
9 Presupuesto	161
9.1 Presupuesto ELC	161
9.2 Presupuesto componentes del cuarto de maquinas	164
9.3 Presupuesto componentes de la red de distribución eléctrica	165
10 Referencias	169
11 Bibliografía	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regulador de voltaje para plantas hidroeléctricas EMAS.....	4
Figura 2. Esquema simplificado microcentral hidroeléctrica.....	6
Figura 3. Perdidas generales en minicentral hidroelectrica aislada (Harvey, 1993).....	12
Figura 4. Esquemas generales de microcentrales hidroeléctricas. (Federico Coz, 1995).....	
Figura 5. Dibujo de microcentral hidroelectrica en detalle. (Teodoro Sanchez, Rafael Escobar, 2012).....	14
Figura 6. Esquema general de una tuberia forzada. (Federico Coz, 1995)	
Figura 7. Esquema y rodete de turbina Pelton.	20
Figura 8. Esquema de turbina Francis.....	
Figura 9. Turbina banki	
Figura 10. Esquemas de turbinas Kaplan.....	
Figura 11. Esquema de un sistema de transmisión. (Federico Coz, 1995).....	25
Figura 12. Alternador de armadura rotativa. (Federico Coz, 1995).....	29
Figura 13. Alternador de campo rotativo de polos salientes y polos lisos. (Federico Coz, 1995)	30
Figura 14. Alternador de campo rotativo monofásico y onda generada. (Federico Coz, 1995)	30
Figura 15. Alternador de campo rotativo trifásico y ondas generadas. (Federico Coz, 1995) ..	
Figura 16. Generador síncrono de imanes permanentes. (Santizar, 2018).....	32
Figura 17. Generador síncrono aislado en central hidroeléctrica (Mora, 2015).....	33
Figura 18. Circuito equivalente maquina síncrona aislada (Mora, 2015)	33
Figura 19. Rotor de una maquina asíncrona.....	37
Figura 20. Dibujo en 3D de una maquina asíncrona.	37
Figura 21. Regulador hidráulico automático (Díaz, 2018).....	39
Figura 22. Esquema básico ELC (Díaz, 2018).....	40
Figura 23. ELC regulado por PWM (Nan Win Aung, 2015)	43
Figura 24. Salida en la carga de un ELC regulado por PWM de la tensión y el duty cycle. (Nan Win Aung, 2015).....	44
Figura 25. Esquema ELC por regulación digital. (Rojan Bhattarai, 2013)	45
Figura 26. Esquema ELC por regulación PWM. (Rojan Bhattarai, 2013).....	47
Figura 27. Gráfica de la diferencia de alturas obtenida con altímetro en caso teórico.....	58

Figura 28. Esquema general de la microcentral teórica. (Buchner, 2005)	59
Figura 29. Planteamiento de captación para microcentral teórica basada en la de EMAS. (Buchner, 2005)	60
Figura 30. Turbina banki seleccionada con eje y rodamientos (Ayude Prieto, 2018).....	62
Figura 31. Esquemas del eje de la turbina microcentral teórica.....	64
Figura 32. Generador síncrono trifásico ideal en Matlab	69
Figura 33. Gráfica de tensión obtenida en simulación de MATLAB.....	69
Figura 34. Gráfica de intensidad MATLAB caso 1	70
Figura 35. Gráfica de intensidad MATLAB caso 2	70
Figura 36. Gráfica de intensidad MATLAB caso 3	70
Figura 37. Gráfica de potencias MATLAB caso 1.....	71
Figura 38. Gráfica de potencias MATLAB caso 3.....	71
Figura 39. Esquema simplificado de ELC monofásico	72
Figura 40. Código ELC caso monofásico, definición de pines.....	75
Figura 41. Código ELC caso monofásico, definición de variables.....	76
Figura 42. Código ELC caso monofásico, definición de pines como entradas y salidas.....	76
Figura 43. Código ELC caso monofásico, configuración timer 4 como interrupción.....	77
Figura 44. Código ELC caso monofásico, configuración timer 5 como contador de frecuencia.....	78
Figura 45. Código ELC caso monofásico, configuración timer 3 para PWM.....	78
Figura 46. Fuentes de tensión equilibrada ELC caso monofásico	79
Figura 47. Arduino Mega 2560 simulado en proteus con conexión a LCD en ELC caso monofásico.....	81
Figura 48. Código ELC caso monofásico, mensaje inicial LCD.....	81
Figura 49. Circuito medidor de tensión caso monofásico	82
Figura 50. Sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T y filtro recomendado	
Figura 51. Circuito medidor de corriente ELC caso monofásico.....	84
Figura 52. Circuito medidor de frecuencia ELC caso monofásico.....	86
Figura 53. Entrada de frecuencia en pin 47 ELC monofásico a 50 Hz	86
Figura 54. Unidad de potencia ELC caso monofásico	87
Figura 55. Diagrama de bloques general de los ELC	89
Figura 56. Código ELC caso monofásico, loop principal.....	89
Figura 57. Código ELC caso monofásico, interrupción (ISR)	90
Figura 58. Diagrama de bloques ELC caso monofásico, interrupción (ISR)	91

Figura 59. Código ELC trifásico con una carga por fase, definición de pines, variable y pines	94
Figura 60. Código ELC trifásico con una carga por fase, definición de timers.....	95
Figura 61. Arduino Mega 2560 con conexión a LCD en ELC, caso trifásico con carga por fase.	96
Figura 62. Código ELC trifásico con una carga por fase, mensaje inicial LCD.....	96
Figura 63. Circuito medidor de corriente ELC caso trifásico con carga por fase.....	97
Figura 64. Código ELC caso trifásico con carga por fase, loop principal	99
Figura 65. Diagrama de bloques ISR, ciclo de trabajo en ELC caso trifásico con carga por fase	100
Figura 66. Código ELC trifásico con una carga por fase, ISR.	101
Figura 67. Diseño básico ELC caso trifásico con una carga	102
Figura 68. Ejemplo de duty cycle caso trifásico con una carga (Rojan Bhattarai, 2013)	103
Figura 69. Tensiones de salida rectificador de media onda trifásico	104
Figura 70. Timers caso trifásico con una carga	106
Figura 71. Circuito para determinar la fase, caso trifásico con una carga.....	107
Figura 72. Tensión de salida circuito para determinar la fase	107
Figura 73. Tensión de salida circuito para determinar la fase, tres fases en funcionamiento	108
Figura 74. Circuito unidad de potencia caso trifásico con única carga por fase	109
Figura 75. Diagrama de bloques cálculos de ciclo de trabajo, ELC trifásico con única carga	110
Figura 76. Líneas de código de ISR ELC trifásico con única carga.....	111
Figura 77. Parte del rodete de la turbina banki para la maqueta.....	127
Figura 78. Maqueta vista de la turbina, la caja de protección y el distribuidor	127
Figura 79. Vista de la maqueta, generador y transmisión de potencia.....	127
Figura 80. Vista de la maqueta, transmisión de potencia.....	128
Figura 81. Vista general de la maqueta con el varador de frecuencia y la carga de frenado	128
Figura 82. Curva característica de la bomba y punto de funcionamiento.	129
Figura 83. Variador de frecuencia Micromaster 440 y reóstato de frenado	130
Figura 84. IGBT y reóstato de frenado en Micromaster.....	131
Figura 85. Simulación 3 A y 50 Hz	133
Figura 86. Simulación 3 A y 55 Hz	134
Figura 87. Simulación 10 A y 50 Hz.....	134

Figura 88. Simulación 10 A y 55 Hz	134
Figura 89. Simulación 21,7 A y 50 Hz.....	135
Figura 90. Simulación 21,7 A y 55 Hz.....	135
Figura 91. Simulación 0 A y 50 Hz	135
Figura 92. Diferencia entre el duty cycle con 50 (azul) y 55 (verde) Hz.....	136
Figura 93. Diferencia corriente real simulación (Roja) y corriente obtenida (Azul).....	136
Figura 94. Simulación Circuito de potencia.....	137
Figura 95. Gráficas simulacion de unidad de potencia.....	137
Figura 96. Equipos usados en ensayos reales ELC monofásico.....	
Figura 97. Resultados duty cycle ensayo real monofásico 21,7 A. 50 Hz (Izda) y 55 Hz (Dcha)	139
Figura 98. Resultados duty cycle ensayo real monofásico 10 A. 50 Hz (Izda) y 55 Hz (Dcha)	139
Figura 99. Resultados duty cycle ensayo real monofásico 3 A. 50 Hz (Izda) y 55 Hz (Dcha)	139
Figura 100. Simulación caso trifásico con carga por fase.....	140
Figura 101. Duty cycle y seguimiento de tensiones simulación caso trifásico con una carga.	141
Figura 102. LCD simulación caso trifásico con una carga.	141
Figura 103. Taladro con generador y circuito ensayo caso trifásico con única carga.	142
Figura 104. Resultado ensayo real caso trifásico con única carga.....	142
Figura 105. Ensayo de la maqueta con máquina de cc.....	143
Figura 106. Diagrama de Gantt 1	158
Figura 107. Diagrama de Gantt 3	
Figura 108. Diagrama de Gantt 2	
Figura 109. Diagrama de Gantt 5	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Clasificación de centrales hidroeléctricas según su potencia.....	7
Tabla II. Comparativa de materiales para tuberías de presión. (Federico Coz, 1995)	18
Tabla III. Distintos tipos de turbinas y sus características principales. (Federico Coz, 1995)	24
Tabla IV. Comparativa entre reguladores de velocidad en centrales hidroeléctricas.....	42
Tabla V. Demanda comunidad rural teórica.....	57
Tabla VI. Medida del caudal por baldeo en caso teorico.....	58
Tabla VII. Característica básica turbina banki para microcentral teórica.	63
Tabla VIII. Características generadores ST	65
Tabla IX. Características generador ST.....	67
Tabla X. Resultados ensayo generador teórico en MATLAB	69
Tabla XI. Componentes necesarios fuente de alimentación ELC monofásico.....	80
Tabla XII. Componentes necesarios circuito medidor de tensión ELC monofásico	82
Tabla XIII. Características generales sensor de corriente ACS712ELCTR-30A-T.....	84
Tabla XIV. Componentes necesarios circuito medidor de corriente ELC monofásico	85
Tabla XV. Componentes necesarios circuito medidor de frecuencia ELC monofásico	86
Tabla XVI. Componentes necesarios circuito unidad de potencia ELC monofásico.....	88
Tabla XVII. Componentes necesarios unidad de potencia ELC trifásico con carga por fase	99
Tabla XVIII. Tabla de la verdad tensiones caso trifásico con una carga.....	103
Tabla XIX. Componentes utilizados en el circuito para determinar la fase, caso trifásico única carga	108
Tabla XX. Componentes necesarios unidad de potencia ELC trifásico con única carga ...	109
Tabla XXI. Cables y protecciones cuarto de máquinas caso monofásico.....	113
Tabla XXII. Canalizaciones cuarto de máquinas caso monofásico	114
Tabla XXIII. Cables y protecciones cuarto de máquinas casos trifásicos.....	115
Tabla XXIV. Canalizaciones cuarto de máquinas caso trifásico.....	115
Tabla XXV. Componentes acometida aérea caso monofásico.....	117
Tabla XXVI. Componentes acometida aérea caso trifásico	118
Tabla XXVII. Componentes LGA y CGP caso monofásico	118
Tabla XXVIII. Canalización LGA caso monofásico	118
Tabla XXIX. Componentes LGA y CGP caso trifásico.....	119

Tabla XXX. Canalización LGA caso trifásico	119
Tabla XXXI. Componentes líneas de enlace e iluminación auxiliar.....	119
Tabla XXXII. Canalizaciones líneas de enlace e iluminación auxiliar.....	120
Tabla XXXIII. Componentes de las derivaciones individuales en la línea de enlace oeste	121
Tabla XXXIV. Canalizaciones de las derivaciones individuales en la línea de enlace este	122
Tabla XXXV. Componentes de las derivaciones individuales en la línea de enlace centro	122
Tabla XXXVI. Canalizaciones de las derivaciones individuales en la línea de enlace centro	123
Tabla XXXVII. Componentes de las derivaciones individuales en la línea de enlace este.	124
Tabla XXXVIII. Canalizaciones de las derivaciones individuales en la línea de enlace oeste	125
Tabla XXXIX. Características generales maqueta.....	126
Tabla XL. Características transmisión de potencia.....	128
Tabla XLI. Parámetros del micromaster reseñables para este ensayo	131
Tabla XLII. Resultados simulación Proteus caso monofásico.....	132
Tabla XLIII. Resultados simulación caso trifásico con carga por fase	140
Tabla XLIV. Resultados ensayo maqueta con generador cc	144
Tabla XLV. Rendimientos obtenidos maqueta con generador de cc.....	144
Tabla XLVI. Presupuesto ELC caso monofásico.....	161
Tabla XLVII. Presupuesto ELC caso trifásico con carga por fase	162
Tabla XLVIII. Presupuesto ELC caso trifásico con única carga.....	163
Tabla XLIX. Presupuesto cuarto de máquinas caso monofásico	164
Tabla L. Presupuesto cuarto de máquinas caso trifásico con carga por fase	165
Tabla LI. Presupuesto de componentes red de distribución eléctrica monofásica	165
Tabla LII. Presupuesto de componentes red de distribución eléctrica trifásica.....	167