



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORES: ASIPUELA GONZÁLEZ, ANGEL GABRIEL
PAREDES ESPINOZA, CRISTINA FABIOLA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
VELOCIDAD Y VOLTAJE PARA LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN DE LA
CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO**

DIRECTOR: ING. ORTIZ, HUGO

CODIRECTOR: ING. GORDILLO, RODOLFO

SANGOLQUÍ, DICIEMBRE 2013

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

CERTIFICADO

Ing. Hugo Ortiz

Ing. Rodolfo Gordillo

CERTIFICAN:

Que el trabajo titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE PARA LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO”, realizado por el Sr. Angel Gabriel Asipuela González y la Srta. Cristina Fabiola Paredes Espinoza, ha sido guiada y revisada periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el reglamento de estudiantes de la Universidad de las fuerzas armadas – ESPE.

Debido a que se trata de un trabajo de investigación recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de un documento empastado y un disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan al Sr. Angel Gabriel Asipuela González y la Srta. Cristina Fabiola Paredes Espinoza que lo entreguen al Ing. Luis Orozco, en su calidad de coordinador de la carrera.

Sangolquí, diciembre de 2013

Ing. Hugo Ortiz
DIRECTOR

Ing. Rodolfo Gordillo
CO - DIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

ANGEL GABRIEL ASIPUELA GONZÁLEZ

CRISTINA FABIOLA PAREDES ESPINOZA

DECLARO QUE:

El proyecto de grado denominado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE PARA LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie, de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, diciembre de 2013

Sr. Angel Gabriel Asipuela González

Srta. Cristina Fabiola Paredes
Espinoza

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Angel Gabriel Asipuela González y Cristina Fabiola Paredes Espinoza

Autorizamos a la Universidad de las fuerzas armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE PARA LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría

Sangolquí, diciembre de 2013

Sr. Angel Gabriel Asipuela González

Srta. Cristina Fabiola Paredes
Espinoza

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico especialmente a Dios y a mi familia, por ayudar y permitir cumplir una de mis metas.

Especialmente a mi madre porque me enseñó que el trabajo con esfuerzo es gratificante.

A mi hermano y hermanas por su apoyo y compañía.

A mis pequeños sobrinos que hacen y alegran mis días, y permitir este trabajo sea de inspiración para ellos.

A mis amigos de la universidad por su apoyo y compañía.

Angel Asipuela

A mi papito bello del cielo que me da la fuerza y la sabiduría para enfrentarme al camino de la vida con dedicación y esperanza.

A mi madre que con su esfuerzo y dedicación me ha demostrado que no hay obstáculos cuando uno lucha por lo que quiere.

A mis hermanos que me han demostrado que las diferencias no separan los lazos de cariño y que el apoyo es incondicional.

A mi abuelita que ha sido constante y preocupada en todo el proceso de desarrollo de este proyecto haciendo crecer en mí esa constancia en mi trabajo.

A mi padre que me ha apoyado en todo lo que le he pedido para la realización de este proyecto.

Cristina Paredes

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por ser parte de mi vida y brindarme la oportunidad de ser mejor cada día.

Mi más sincero agradecimiento a los Ing. Milton y Carlos por su apoyo durante la realización de este trabajo.

Gracias a mi familia por su apoyo y permitir continuarme mis estudios.

Gracias a mis amigos Byron, Verito, Criss, Faby, Toñito, Byron y más amigos por su apoyo durante mi preparación académica.

Angel Asipuela

Gracias primeramente al padre del cielo que nos guía en todos los pasos que damos.

Gracias a todas las personas que influyeron e intervinieron en el desarrollo de este proyecto porque aprendimos muchas cosas valiosas para el comienzo de una nueva etapa en nuestras vidas. A los ingenieros de la central Guangopolo y a los ingenieros de la universidad que nos supieron guiar en el recorrido de realización de este proyecto y por supuesto gracias a mis amigos que indirectamente influyeron en mí para seguir adelante.

Cristina Paredes

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO.....	4
1.5 OBJETIVOS	5
1.5.1 General	5
1.5.2 Específicos.....	5
CAPÍTULO 2.....	7
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1 CENTRALES GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA	7
2.2 PROCESOS BÁSICOS PARA UNA GENERADORA TERMOELÉCTRICA.....	9
2.2.1 Sistema de refrigeración	9
2.2.1.1 Clarificación de agua	9
2.2.1.2 Desmineralización.....	11
2.2.1.3 Enfriamiento	12
2.2.2 Sistema de Suministro de Combustibles	12
2.2.3 Sistema de suministro de Aceite Lubricante	12
2.2.4 Sistema de generación de vapor.....	14
2.2.5 Conversión de energía eléctrica.....	15
2.2.6 Entrega de energía eléctrica.....	16
2.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	16
2.3.1 Principios Termodinámicos.....	16
2.3.1.1 Ciclo del Motor de combustión interna	17
2.3.2 Principios Físicos.....	19
2.4 GENERADORES	20
2.5 COMBUSTIBLE DIESEL – BUNKER	24

2.6 SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD	25
2.6.1 Elementos de un Controlador de Velocidad	26
2.7 SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE	27
2.7.1 Elementos de un sistema de excitación.....	28
2.7.2 Modelo de un A.V.R.....	31
2.8 FALLAS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO	32
CAPÍTULO 3.....	35
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN	35
3.1 COMPONENTES DE LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN.....	35
3.1.1 Sistema Motor	35
3.1.2 Sistema de suministro de combustible	38
3.1.3 Sistema de suministro de aceite lubricante	39
3.1.4 Sistema de producción de vapor	40
3.1.5 Sistema de tratamiento de agua para enfriamiento.....	40
3.1.6 Sistema Generador.....	41
3.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN	43
3.2.1 Sistema de Control de Velocidad	45
3.2.2 Sistema de control de Voltaje	48
3.3 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE DE LA CENTRAL GUANGOPOLO	51
CAPÍTULO 4.....	56
DISEÑO.....	56
4.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	56
4.1.1 Obtención de los datos de entrada y salida	57
4.1.2 Tratamiento previo de los datos obtenidos.....	61
4.2 MODELAMIENTO.....	62
4.2.3 Elección de la estructura del modelo	62
4.2.4 Obtención de los parámetros del modelo	64
4.2.5 Validación del modelo	76
4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR.....	80
CAPÍTULO 5.....	93
SIMULACIÓN	93

5.1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN.....	93
5.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD	94
5.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE	98
5.4 ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE REPUESTA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y PROTECCIÓN ANTE UNA APERTURA SÚBITA DEL RELÉ DE DISTANCIA	103
CAPÍTULO 6.....	123
IMPLEMENTACIÓN.....	123
6.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VELOCIDAD.....	123
6.1.1 INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD.....	124
6.1.2 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS	139
6.1.2.1 Configuración del controlador de velocidad Woodward.....	139
6.1.2.2 Programación del software del controlador	141
6.1.3 INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI) PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD	145
6.1.4 PUESTA EN MARCHA	154
6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VOLTAJE.....	155
6.2.1 INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE.....	155
6.2.2 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS	165
6.2.3 INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI) PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE.....	169
6.2.4 PUESTA EN MARCHA	172
CAPÍTULO 7.....	175
PRUEBAS Y RESULTADOS	175
7.1 PRUEBAS.....	175
7.1.1 PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD.....	175
7.1.1.1 Pruebas en el sensor de detección de velocidad	175
7.1.1.2 Pruebas de la Interface HMI	176
7.1.1.3 Pruebas del Controlador Lógico Programable (PLC)	176
7.1.1.4 Pruebas Globales	177
7.1.2 PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE.....	177
7.1.2.1 Pruebas de la Interface HMI	178
7.1.2.2 Pruebas Globales	178

7.2 RESULTADOS.....	179
7.2.1 Resultados de Operación.....	179
7.2.2 Resultados del Sistema de Control de Velocidad.....	179
7.2.3 Resultados del Sistema de Control de Voltaje.....	180
7.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN.....	180
7.2.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA IMPLEMENTACIÓN.....	185
7.2.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO E IMPLEMENTADO.....	189
7.3 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS.....	191
CAPÍTULO 8.....	195
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	195
8.1 CONCLUSIONES.....	195
8.2 RECOMENDACIONES.....	196
BIBLIOGRAFÍA.....	198
GLOSARIO.....	200

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas del sistema de suministro de combustible, (SALAZAR MONGE, 2011).....	13
Tabla 2. Etapas del Sistema de suministro de Aceites de Lubricación, (SALAZAR MONGE, 2011)	14
Tabla 3. Elementos de un generador	22
Tabla 4. Características del motor de combustión interna de la unidad 4 de generación, (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)	37
Tabla 5. Dimensiones del motor de combustión interna de la unidad 4 de generación, (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)	37
Tabla 6. Características del governor actual de la C.T. Guangopolo UG – 40	38
Tabla 7. Propiedades de los combustibles Diesel y Bunker, (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)	39
Tabla 8. Características de los aceites lubricantes, (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)	40
Tabla 9. Químicos utilizados en el tratamiento de agua, (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)	41
Tabla 10. Características de las partes del sistema de generación.....	42
Tabla 11. Consideraciones para la elección de datos de la unidad 4 de generación del sistema de control de velocidad	59
Tabla 12. Consideraciones para la elección de datos de la unidad 4 de generación del sistema de control de voltaje.....	61
Tabla 13. Muestra de datos de Voltaje de Excitación tomados de la sala de control en el momento del arranque	79
Tabla 14. Características del controlador de velocidad, Woodward	80
Tabla 15. Parámetros de ajuste del método de oscilación por Ziegler - Nichols.....	82
Tabla 16. Parámetro del Control PID del sistema de Control de Velocidad.....	87
Tabla 17. Parámetro del Control PID del sistema de Control de Velocidad.....	92
Tabla 18. Parámetros PID utilizados en la simulación	98
Tabla 19. Parámetros PID utilizados en la simulación	102
Tabla 20. Demanda de los sistemas de auxiliares, valores obtenidos de planos eléctricos Guangopolo.	105
Tabla 21. Características del tiempo de operación para el relé KIW4-KP	109
Tabla 22. Características del tiempo de operación para el relé KIE-KP.	110
Tabla 23. Características del tiempo de operación para el relé KI0-LGP	110
Tabla 24. Características del tiempo de operación para el relé KIY ₂ – C ₅ H.....	111
Tabla 25. Característica porcentual del relé tipo KID-GRP.	112
Tabla 26. Curva de operación del relé 51VG.	113
Tabla 27. Características R-X, Impedancia y corriente, y el tiempo de operación según la reactancia.....	114

Tabla 28. Curva de operación del relé 51F tipo KIO-CP	116
Tabla 29. Características del tiempo de operación para el relé KIO-LGP.	116
Tabla 30. Características del tiempo de operación para el relé KIE ₁ -KP.	117
Tabla 31. Características del tiempo de operación para el relé tipo KIU-KP.	118
Tabla 32. Tiempos de disparo de los relés de protección.	121
Tabla 33. Tiempo de estabilización de los controladores.	122
Tabla 34. Especificaciones generales de la tarjeta electrónica Woodward 2301D.	124
Tabla 35. Características del actuador UG-Actuator utilizado en la UG4	135
Tabla 36. Características del PLC Twido y el módulo de ampliación (Schneider Electric, 2008).....	135
Tabla 37. Características de la fuente de alimentación utilizada en el panel de control de la UG4.....	138
Tabla 38. Parámetros configurados en la implementación del dispositivo Woodward 2301D.....	140
Tabla 39. Aspectos considerados en la guía GEDIS para el diseño de HMI	145
Tabla 40. Navegación de la ventana de Control de Velocidad	150
Tabla 41. Estándar de Colores utilizado en la ventana de Control de Velocidad.....	151
Tabla 42. Detalles del texto utilizado en la ventana de Control de Velocidad.....	151
Tabla 43. Indicadores y Botones de la ventana de Control de Velocidad.....	153
Tabla 44. Características generales del dispositivo Basler Electric.....	155
Tabla 45. Terminales de la alimentación del DECS – 200	158
Tabla 46. Terminal de conexión a tierra.....	159
Tabla 47. Terminales de la potencia de operación.....	159
Tabla 48. Terminales de detección del bus y del generador	160
Tabla 49. Terminales de detección de Corriente del Generador	161
Tabla 50. Terminales para las entradas de accesorios	161
Tabla 51. Terminales de los contactos de entrada del DECS – 200	162
Tabla 52. Terminales de los contactos de salida del DECS – 200	162
Tabla 53. Terminales de la salida de Campo del DECS – 200.....	163
Tabla 54. Terminales del puerto COM2	163
Tabla 55. Características generales del generador UG4, para el software Bestcoms .	168
Tabla 56. Parámetros configurados en la implementación del dispositivo Woodward 2301D.....	169
Tabla 57. Navegación de la ventana de Control de Voltaje.....	171
Tabla 58. Valores en porcentaje alcanzado de acuerdo al objetivo establecido en la UG4	184
Tabla 59. Valores en porcentaje alcanzado de acuerdo al objetivo establecido en la UG4	188
Tabla 60. Comparación de resultados, Simulación – Implementación	190
Tabla 61. Características Generales del fabricante de la UG4.....	192
Tabla 62. Evaluación de resultados obtenidos en la UG4 de la C.T. Guangopolo.....	193
Tabla 63. Evaluación de resultados obtenidos de los máximos picos y tiempos de establecimiento.....	194

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de Generación eléctrica de la central termoeléctrica Guangopolo..	10
Figura 2. Ejemplo de fuerza producida por la combustión en un cilindro.....	17
Figura 3. Partes de un motor de Combustión Interna [Imagen de propiedad www.howstuffwork.com]	19
Figura 4. Mecanismo del movimiento lineal – rotativo [Imagen de propiedad Martínez Villegas A.].....	20
Figura 5. Elementos de un generador síncrono. [Imagen de propiedad: Álvarez 12/09]	22
Figura 6. Diagrama fasorial del modelo de un generador síncrono con polos salientes [Imagen de Propiedad Bolaños Mena. 2012]	23
Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad.....	26
Figura 8. Diagrama del sistema de control de excitación de un generador síncrono...	28
Figura 9. Sistema de control de un generador [Imagen de propiedad Fumagalli L.]....	30
Figura 10. Controlador PID del AVR	32
Figura 11. Gráfica de estimación de fallas del SNI en el año 2012 (a) Frecuencia de fallas (b) Tiempo de fallas [Imagen de propiedad Sánchez Iñiguez, Tates Simbaña]	34
Figura 12. Esquema de funcionamiento de la unidad 4 de generación	44
Figura 13. Característica Frecuencia - Potencia [Imagen de Propiedad E.T.S. 2011]	45
Figura 14. Sistema de control de velocidad manual con el actuador UG - 40	46
Figura 15. Curva de Arranque - Parada de las unidades de generación de la C.T. Guangopolo.....	48
Figura 16. Diagrama del sistema de excitación empleando rectificadores (sin escobillas) [Imagen de Propiedad IEEE 421.1, 1986]	49
Figura 17. Diagrama del sistema de control de voltaje de la unidad No. 4.....	50
Figura 18. Curva de Potencia Activa (KW) de la Unidad No.4 (a) Generación en un periodo de 1 día, (b) Acercamiento a la potencia normal de funcionamiento	52
Figura 19. Frecuencia de funcionamiento de la Unidad No. 4.....	52
Figura 20. Curva de Tensión de salida, tensión generada	54
Figura 21. Curva de Potencia Reactiva de la Unidad de generación No.4	54
Figura 22. Diagrama de control del sistema de velocidad	57
Figura 23. Curva de Velocidad actual de la UG4	58
Figura 24. Diagrama de control del sistema de Voltaje	59
Figura 25. Curva del Voltaje actual de Excitación de la UG4	60
Figura 26. Diagrama de la planta.....	62
Figura 27. Diagrama de la estimación de parámetros.....	67
Figura 28. Vectores de Entrada y salida en el directorio de matlab (a) Importar datos en el directorio de matlab (b) Creando una nueva variable en el directorio de matlab.....	70

Figura 29. Conversión de vectores de entrada y salida a objeto de datos para la identificación.....	71
Figura 30. Sistema de Identificación de matlab.....	71
Figura 31. Importando los datos de entrada y salida en IDENT de Matlab.....	72
Figura 32. Linear Parametric Models, escogiendo el modelo y el orden de la planta ..	73
Figura 33. Modelo de la Planta (a) Gráfica de salida del modelo de identificación (b) Parámetros obtenidos del modelo de identificación	74
Figura 34. Modelo obtenido con la herramienta IDENT, modelo ARX.....	75
Figura 35. Gráfica de Velocidad, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de velocidad	77
Figura 36. Gráfica de Potencia Activa, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de velocidad	77
Figura 37. Gráfica de Voltaje, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de voltaje	78
Figura 38. Gráfica de Potencia Reactiva, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de voltaje.....	78
Figura 39. Diagrama del sistema de control de velocidad en lazo cerrado.....	80
Figura 40. Parámetros de ajuste del método de oscilación por Ziegler - Nichols.....	83
Figura 41. Comando d2c para sistema continuo, regulador de velocidad	83
Figura 42. Controlador Proporcional para el sistema regulador de velocidad, para encontrar Kcr	84
Figura 43. Control PID del sistema de velocidad, para la planta de velocidad	86
Figura 44. Control PID del sistema de velocidad, para la planta de potencia activa...	87
Figura 45. Comando tf de matlab, función de transferencia discreta, regulador de voltaje.....	88
Figura 46. Comando d2c para sistema continuo, regulador de voltaje.....	88
Figura 47. Controlador Proporcional para el sistema regulador de voltaje, para encontrar Kcr.....	89
Figura 48. Diagrama de Control PID del sistema de voltaje, Voltaje	91
Figura 49. Diagrama de Control PID del sistema de voltaje, Potencia Reactiva.....	91
Figura 50. Modelo del Control de Potencia Reactiva del dispositivo DECS - 200, [Imagen de Propiedad (Basler Electric, 2011)].....	92
Figura 51. Esquema básico de un regulador de velocidad moderno, modelo DEGOV1, Woodward diesel governor, [Imagen de Propiedad (AGUERO J. L., 2009)].....	95
Figura 52. Diagrama simplificado del regulador de velocidad	95
Figura 53. Regulador de velocidad, de la unidad 4 de generación en simulink (a) Velocidad (b) Potencia Activa	97
Figura 54. Resultado del control PID en el sistema de control de velocidad	97
Figura 55. Resultados del Control PID aplicado para el control de Potencia Activa	98
Figura 56. Diagrama del sistema de excitación con regulador de tensión, [Imagen de Propiedad, (IEEE 421.5, 2005)]	99
Figura 57. Diagrama simplificado del regulador de voltaje	100

Figura 58. Regulador de Voltaje, de la unidad 4 de generación en simulink (a) Voltaje (b)Potencia Reactiva.....	101
Figura 59. Resultado del control PID en el sistema de control de voltaje	101
Figura 60. Resultados del Control PID aplicado para el control de Potencia Reactiva	102
Figura 61. Esquema de conexión de las unidades de generación al sistema nacional interconectado.....	103
Figura 62. Diagrama unifilar del disyuntor de distancia, en condición de apertura.	106
Figura 63. Diagrama unifilar de conexión de la unidad de generación a los sistemas auxiliares.	107
Figura 64. Condiciones de disparo del interruptor 4 52.....	108
Figura 65. Características del tiempo de operación para el relé KIW4-KP, (Meidensha, 1970).....	109
Figura 66. Características del tiempo de operación para el relé KIE-KP, (Meidensha, 1970).....	109
Figura 67. Características del tiempo de operación para el relé KIO-LGP, (Meidensha, 1970).....	110
Figura 68. Características del tiempo de operación para el relé KIY ₂ – C ₅ H, (Meidensha, 1970).....	111
Figura 69. Característica porcentual del relé tipo KID-GRP, (Meidensha, 1970).....	112
Figura 70. Curva de operación del relé 51VG, (Meidensha, 1970).....	113
Figura 71. Características R-X, Impedancia y corriente, y el tiempo de operación según la reactancia, (Meidensha, 1970).	114
Figura 72. Esquema de condiciones para la apertura de los interruptores B52F y B52L.....	115
Figura 73. Curva de operación del relé 51F tipo KIO-CP, (Meidensha, 1970).....	115
Figura 74. Características del tiempo de operación para el relé KIO-LGP, (Meidensha, 1970).....	116
Figura 75. Características del tiempo de operación para el relé KIE ₁ -KP, (Meidensha, 1970).....	117
Figura 76. Características del tiempo de operación para el relé tipo KIU-KP, (Meidensha, 1970).....	118
Figura 77. Respuesta del controlador de velocidad a una referencia de 400 rpm.....	119
Figura 78. Respuesta del controlador de voltaje a una referencia de 6.6 kV.....	119
Figura 79. Respuesta del controlador de potencia a una referencia de 5 MW.	120
Figura 80. Respuesta del controlador de voltaje a una referencia de 2 Mvar.	120
Figura 81. Crear un proyecto en el Software Twido Suite	141
Figura 82. Selección del PLC y el módulo de ampliación en el software Twido Suite, (a) PLC, (b) Módulo de Ampliación.....	142
Figura 83. Entradas y Salidas del PLC en el software Twido Suite	143
Figura 84. Sección de programación en el software Twido Suite	143
Figura 85. Depuración del programa en el PLC	144
Figura 86. Diagrama de Flujo de la Rampa de arranque de la UG4.....	146
Figura 87. Diagrama de Flujo de la rampa de salida de la UG4	147

Figura 88. Diagrama de Flujo del Modo Carga Base y Modo Droop	148
Figura 89. Plantilla de la ventana de Control de Velocidad	150
Figura 90. Interfaz Humano Máquina del Regulador de velocidad de la UG4	153
Figura 91. Terminales de la sección Izquierda del Panel del DECS - 200.....	157
Figura 92. Iniciar comunicación con DECS – 200	167
Figura 93. Escoger el Puerto de Comunicación conectado al DECS - 200	167
Figura 94. Datos del Sistema del generador en el software Bestcoms.....	168
Figura 95. Plantilla de la ventana de Control de Voltaje	170
Figura 96. Interfaz Humano Máquina del Regulador de Velocidad y Voltaje de la UG4.....	173
Figura 97. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de velocidad (0 a 200 rpm)	181
Figura 98. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de Potencia Activa (300 a 1300 KW)	182
Figura 99. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de Voltaje (0 a 40 V).....	182
Figura 100. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de Potencia Reactiva (600 a 970 Var).....	183
Figura 101. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de la rampa de Velocidad (de 200 a 400 rpm)	186
Figura 102. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de Potencia Activa (de 4700 a 5000 KW).....	186
Figura 103. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de Voltaje (de 0 a 24 V).....	187
Figura 104. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de Potencia Reactiva (de 1780 a 2090 KVar).....	187

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Motor de Combustión Interna Unidad 4 de generación de la C. T. Guangopolo	36
Fotografía 2. Governador de la unidad 4 de generación	38
Fotografía 3. Actuador UG-Actuador para el control de velocidad de la UG4.....	134
Fotografía 4. Regulador de Velocidad instalado, Woodward 2301D	136
Fotografía 5. PLC instalado en el panel de control de la UG4, Twido	136
Fotografía 6. Cableado de las señales de entrada y salida del PLC, twido instalado en el panel de control de la UG4 (a) Entradas (b) Salidas.....	137
Fotografía 7. Modulo de ampliación de salidas y entradas analógicas instalado en el panel de control de la UG4, Twido	138
Fotografía 8. Fuente de alimentación de 24 VDC, Weidmuller.....	139
Fotografía 9. Dispositivo DECS - 200 instalado en la sala de máquinas de la C.T. Guangopolo	165
Fotografía 10. Sistema de Control de Voltaje instalado en la sala de máquinas de la C.T. Guangopolo.....	166

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1.....	A1. ¡Error! Marcador no definido.
PROGRAMA DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC), TWIDO PARA EL REGULADOR DE VELOCIDAD	
ANEXO 2.....	A2. ¡Error! Marcador no definido.
PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE	
ANEXO 3.....	A3. ¡Error! Marcador no definido.
LISTA DE MATERIALES PARA LA INSTALACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD Y DE VOLTAJE	
ANEXO 4.....	A4. ¡Error! Marcador no definido.
PROTOCOLO DE PRUEBAS EN SITIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE	
ANEXO 5.....	A5. ¡Error! Marcador no definido.
MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE	
ANEXO 6.....	A6. ¡Error! Marcador no definido.
PLANOS ELÉCTRICOS DEL ANTIGUO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE	
ANEXO 7.....	A7.1
PLANOS ELÉCTRICOS Y DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE IMPLEMENTADO	

RESUMEN

La central termoeléctrica Guangopolo cuenta con una potencia instalada de 31,2 MW, distribuidas en 6 unidades de generación marca Mitsubishi MAN de funcionalidades similares y 1.8 MW suministrados por la unidad Wartsila. Actualmente la unidad 4 de generación suministra 5,0 MW de la potencia total. Debido a la demanda de energía existente, las unidades de generación siempre deben estar disponibles para la producción de la misma, además que deben estar preparadas para cualquier evento no planeado que se pueda presentar. Los eventos no planeados que se pueden presentar entre otros, son fallas en el sistema nacional interconectado que activarían las protecciones de la central, este evento en las condiciones actuales causaría la desconexión total de las unidades y de los sistemas auxiliares. Por esta razón el desarrollo de este proyecto plantea un sistema de control de velocidad y voltaje que reaccionen frente a dichas fallas de manera adecuada, conservando una mínima potencia necesaria para mantener energizados los sistemas auxiliares de la central termoeléctrica. En este trabajo se realiza el diseño de los sistemas de control anteriormente mencionados en base a la identificación de la planta y la obtención de parámetros para su regulación, además se procede con la simulación del sistema en el software de Matlab, Simulink para obtener resultados previos a la implementación de los controladores en la unidad. Al finalizar con la implementación se realizan pruebas del comportamiento de los nuevos sistemas de control con el fin de exponer los resultados obtenidos a lo largo del proyecto y que este se pueda extender a las demás unidades de generación de la central termoeléctrica Guangopolo.

Palabras Clave: Regulador de Velocidad, Regulador de Voltaje, Control PID, Identificación de Sistemas

Abstract

The Guangopolo Power Central has an installed capacity of 31,2 MW, divided into 6 units of generation Mitsubishi MAN similar functionalities and 1.8 MW supplied by Wartsila unit. Nowadays the unit 4 supplies 5.0 MW of the total power. Because of existing energy demand the units must always be available for the production of the same, and they must be prepared for any unplanned event that may occur. This unplanned events that may occur among others, are failures in the national interconnected system that would trigger the protections of the plant, this events under actual conditions would cause the disconnection of the units and auxiliary systems. For this reason the development of this project present a speed and voltage control system to react against those failures properly while maintaining a minimum power required to keep energized auxiliary systems of the power plant. In this work we design the aforementioned control systems based on plant identification and obtaining parameters for the regulation also proceed with Matlab, Simulink software system for simulation to obtain previous results for the implementation of the controllers in the unit. At the end of the implementation we are tested the behavior of the new control systems in order to present the results obtained during the project and that this can be applied in the future in other units of Guangopolo Central Power.

Keywords: Speed Regulator, Voltage Regulator, PID Control, System Identification

CAPÍTULO 1.

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo del sector eléctrico es fundamental para el normal desenvolvimiento de las actividades productivas del Ecuador, es por esto que en el país se cuenta con centrales generadoras de energía eléctrica, entre las cuales las más usuales son las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas. Para el caso de interés la central de generación Guangopolo es una central termoeléctrica, en la cual se realizan algunos procesos para llevar a cabo la generación.

Un sistema de generación de energía eléctrica es propenso a la aparición de fallas debido a diversos factores que intervienen en el proceso de generación, y que afectan el flujo normal de producción, el funcionamiento de los equipos que intervienen en este proceso de generación, la operación normal del mismo así como los subprocesos que gobiernan.

CAPÍTULO 1.

Tomando en cuenta los factores anteriormente mencionados se hace indispensable realizar acciones de prevención frente a estos eventos, es por esto que el presente proyecto busca realizar un análisis del comportamiento que debe tener el sistema frente a estas fallas y mantener condiciones normales de funcionamiento.

1.2 ANTECEDENTES

La Central Termoeléctrica Guangopolo está ubicada al Sureste de Quito. Cuenta con una potencia instalada de 31.2 MW, distribuida en 6 motores marca MITSUBISHI MAN cada uno de 5.2 MW. Actualmente se encuentran en funcionamiento las unidades 1, 4 y 6 de generación.

La central utiliza diesel o combustible pesado (Bunker) para la generación de energía eléctrica, el mismo que se lo consigue de los residuos de la refinería Shushufindi, y entrega la producción al sistema nacional interconectado a través de la Subestación La Vicentina.

El Sistema Nacional Interconectado (SNI) incluye el sistema nacional de generación y el sistema nacional de transmisión de energía, los cuales en conjunto se encargan del suministro de la misma. Estos sistemas deben trabajar de manera confiable en cuanto a su operación se refiere, sin embargo a lo largo de los años se han presentado ciertos eventos registrados como alteraciones en el sistema, a dichos eventos se los considera como fallas, las mismas que han producido una serie de efectos negativos como la suspensión del servicio en sectores determinados, daños a largo plazo en equipos y paradas en las centrales de generación.

Es por este motivo que se han realizado varios análisis de confiabilidad del sistema nacional interconectado, disponiendo además en los sistemas de

CAPÍTULO 1.

generación y transmisión dispositivos de protección para evitar que estas fallas generen daños mayores. En la central termoeléctrica Guangopolo se cuenta con un disyuntor frente a las fallas que se puedan producir en el SNI, que cuando se activa, la central debido a su sistema actual, hace que los generadores se apaguen.

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Las fallas en los sistemas interconectados son poco comunes, pero cuando ocurre una de estas y no existe un adecuado sistema de control y protección, esto provoca daños sobre los sistemas mecánicos y protecciones eléctricas de los generadores.

El sistema de Generación Térmica Guangopolo dispone de tres generadores en marcha, para el funcionamiento de los mismos se dispone de sistemas auxiliares. Los sistemas auxiliares son alimentados directamente del sistema nacional interconectado, idealmente cuando ocurre una falla los generadores deberían suministrar la energía eléctrica necesaria para que estos se mantengan energizados.

Actualmente al momento de ocurrir una falla los generadores toman condiciones de sobrevelocidad y sobrevoltaje motivo por el cual, los sistemas de protección activan los disyuntores que llevan a la desconexión total de las máquinas. Para prevenir la desconexión total y evitar que los sistemas auxiliares queden completamente desenergizados se propone realizar un sistema de control de velocidad y voltaje en la unidad 4 de generación, que permita que el generador tome un mínimo de carga establecido, suficiente para el correcto funcionamiento de los sistemas auxiliares.

CAPÍTULO 1.

Por lo anteriormente mencionado es necesario el análisis, diseño e implementación de controladores que mediante la manipulación de combustible y la corriente de excitación proporcionen una respuesta adecuada de velocidad y voltaje ante una falla.

Al tener un sistema de control correctamente regulado permitirá mantener y conservar tanto las partes mecánicas del generador, como los relés de protección.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

En el presente proyecto se realizará el diseño de un sistema de control de velocidad y de voltaje, además de simulaciones para comprobar su funcionamiento y se llevará a cabo la implementación del sistema de voltaje mencionado.

Se iniciará con el análisis del comportamiento y funcionamiento de la unidad 4 de generación, de tal manera que se obtengan los datos y parámetros de funcionamiento necesarios para conocer el actual desenvolvimiento de la unidad y del sistema de control utilizado.

A partir de la identificación de los parámetros, se realizará el diseño de un sistema de control de velocidad para la unidad 4 de generación, de tal manera que se logre optimizar su funcionamiento actual, posteriormente se realizarán simulaciones para obtener señales de respuesta con la participación del sistema de control diseñado.

Además se diseñará un sistema de control de voltaje para la unidad 4 de generación, que permita optimizar el funcionamiento actual frente a posibles

CAPÍTULO 1.

fallas, mejorando sus respuestas, de la misma manera se realizarán simulaciones que comprueben la mejora del sistema.

Se efectuará la implementación del sistema de control de voltaje, realizando las configuraciones y conexiones necesarias para su correcto funcionamiento y para el cumplimiento de los objetivos del sistema mencionado.

Finalmente se realizará una evaluación del comportamiento y mejora que se obtuvo a partir de los sistemas de control diseñados, para mejoras de la generación de energía en la unidad 4.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende plantear una base para posteriores aplicaciones e implementaciones en las demás unidades de generación existentes en la central termoeléctrica Guangopolo.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 General

Diseñar e implementar el sistema de control de voltaje y velocidad de la Unidad 4 de generación de la Central Termoeléctrica Guangopolo para contrarrestar fallas procedentes del SNI (sistema nacional interconectado).

1.5.2 Específicos

- Analizar el proceso de generación termoeléctrica en la central Guangopolo.

CAPÍTULO 1.

- Diseñar un sistema de control de voltaje, eficiente y autónomo, que permita reaccionar adecuadamente frente a una falla del sistema nacional interconectado.
- Diseñar un sistema de control de velocidad, eficiente y autónomo, que permita reaccionar adecuadamente frente a una falla del sistema nacional interconectado.
- Implementar el sistema de control de voltaje en la unidad 4 de generación y evaluar el comportamiento del sistema implementado.
- Implementar el sistema de control de velocidad en la unidad 4 de generación y evaluar el comportamiento del sistema implementado.
- Documentar apropiadamente el proyecto desarrollado.

CAPÍTULO 2.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 CENTRALES GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA (FERNÁNDEZ DIEGO I., 2012)

Las centrales generadoras son las plantas encargadas de la producción de energía eléctrica, su función principalmente es la de transformar cualquier tipo de energía ya sea esta mecánica, química, eólica, etc., en energía eléctrica. Estas se encuentran ubicadas en zonas industriales, en sectores cercanos a fuentes de energía básicas o en grandes ciudades donde existe gran cantidad de demanda.

Estas plantas eléctricas constan de grupos de generación (conjunto de generador y motor). El generador es el encargado de la obtención de electricidad y el motor es el encargado de accionar el mismo.

Existen diferentes tipos de centrales generadoras de acuerdo al tipo de materia prima que empleen para la producción de energía eléctrica, entre las

CAPÍTULO 2.

más utilizadas por no presentar dificultades técnicas y económicas se encuentran las siguientes:

Hidráulica o Hidroeléctrica

Este tipo de centrales aprovechan la energía potencial del agua embalsada generalmente en presas ubicadas a más alto nivel que la central, para accionar las turbinas hidráulicas con la presión que se genera en su descenso.

Nucleares o Termonucleares

Se realiza la transformación de energía nuclear proveniente de los combustibles nucleares como el uranio y el plutonio para lograr la producción de energía eléctrica utilizando turbinas de vapor como máquinas motrices.

Térmicas o Termoeléctricas

Este tipo de central es de mayor interés en cuanto al trabajo de la presente tesis, razón por la cual se hará mayor énfasis en su concepto.

Las centrales termoeléctricas cubren la demanda de energía eléctrica como consecuencia de la energía térmica de combustión. Usan distintos combustibles sólidos (carbón mineral), líquidos (gas-oil y fuel-oil, originarios de la refinación de petróleo crudo) y gaseosos (gas natural) como materia prima. Utilizan turbinas de vapor como máquinas motrices que son accionadas por el vapor de agua que se genera en calderas.

Estas centrales pueden ser situadas en lugares próximos a grupos industriales, refinerías o yacimientos de carbón o en las afueras de grandes ciudades.

CAPÍTULO 2.

El principio de funcionamiento es aprovechar la energía calorífica de un combustible para transformarla en electricidad, siguiendo el siguiente proceso de transformación:

- Se realiza combustión en energía calorífica para que la energía contenida en el combustible se transforme
- La energía calorífica que absorbe el fluido de trabajo se convierte al expandirse en la turbina o motor de energía mecánica
- Y a través de un generador eléctrico, la energía mecánica es transformada a energía eléctrica

2.2 PROCESOS BÁSICOS PARA UNA GENERADORA TERMOELÉCTRICA (SALAZAR MONGE, 2011)

En el diagrama de la Figura No. 1 se muestra una descripción de los procesos y subprocesos que se lleva a cabo en una central termoeléctrica, exclusivamente en la central termoeléctrica Guangopolo.

2.2.1 Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración es empleado para suprimir calor de reacciones químicas, licuar gases de procesos, separar gases por destilación y condensación y purificar productos mediante la congelación de separación selectiva de un componente de una mezcla (ESPINOZA, 2011). Este proceso consta de tres subprocesos como el de clarificación de agua, desmineralización y enfriamiento;

2.2.1.1 Clarificación de agua

En este subproceso se realiza el almacenamiento del agua controlada por una válvula de compuerta desde el reservorio de propiedad de la Empresa

CAPÍTULO 2.

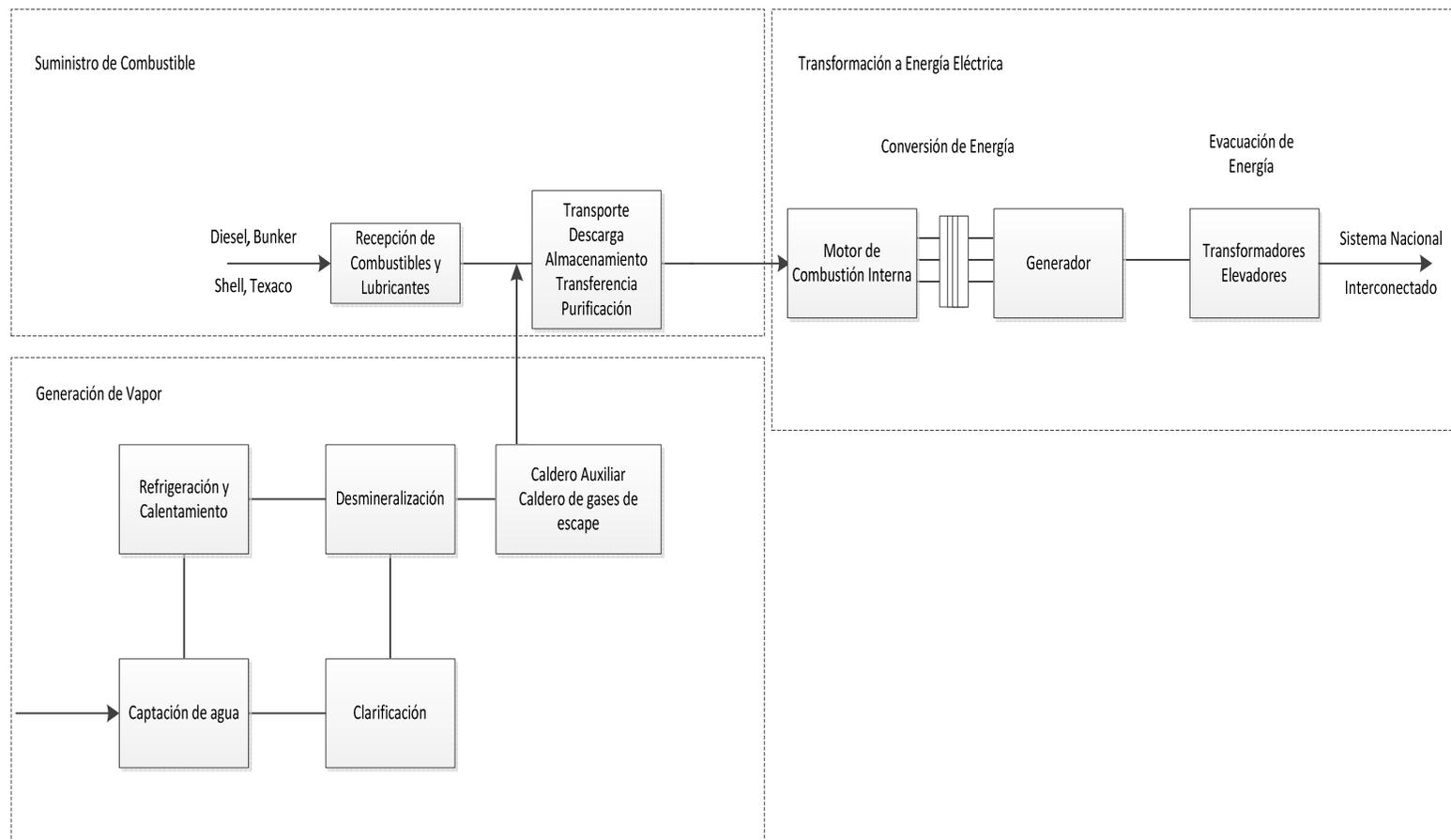


Figura 1. Sistema de Generación eléctrica de la central termoeléctrica Guangopolo

CAPÍTULO 2.

Eléctrica Quito hasta el estanque de captación de agua cruda que posee una rejilla que tiene la finalidad de impedir el paso de impurezas provenientes del reservorio, a esta etapa se la conoce como CAPTACIÓN DE AGUA.

El agua cruda es llevada del estanque de captación hacia el estanque de tratamiento de agua por medio de dos bombas. La clarificación del agua se la realiza por Decantación de Sólidos, en el estanque de tratamiento de agua mismo que está conformado por diferentes tanques como; tanque de agua cruda, mezclador, floculador, sedimentación hasta llegar al tanque intermedio en el que una parte del agua es enviada al proceso de desmineralización y otra a la torre de enfriamiento

2.2.1.2 Desmineralización

Una vez que el agua ha llegado al tanque intermedio es trasladada por medio de dos bombas al estanque de filtración en el que el agua clarificada es filtrado con dos filtros, el primero es de antracita para retirar las impurezas restantes y otro de carbón para retirar el cloro residual.

El agua filtrada es llevada a la torres catiónica y después a la torre aniónica, en estas dos torres se realiza la separación de cationes y aniones respectivamente, para el posterior traslado al tanque de agua pura. En esta etapa es necesario realizar la regeneración de resinas, debido a esto se hace circular en contraflujo ácido sulfúrico en la torre catiónica y sosa caústica en la torre aniónica, (SALAZAR MONGE, 2011).

CAPÍTULO 2.

2.2.1.3 Enfriamiento

El agua trasladada del tanque intermedio a la torre de enfriamiento es primeramente filtrada con antracita para remover posibles impurezas. Posteriormente se almacena el agua en el estanque de enfriamiento, en el cual se incorporan sustancias químicas con el fin de bajar la concentración alcalina del agua y eliminar bacterias.

Por medio de tres bombas se hace circular el agua por los intercambiadores de calor (de aceite del sistema, agua de camisas de cilindro, aceite de turbo alimentador, etc.) de las seis unidades para bajar y mantener condiciones de temperatura normales de operación.

Cabe resaltar que el agua es utilizada por algunos ciclos, luego de cumplidos estos ciclos el agua es evacuada por el desagüe de la torre de enfriamiento, (SALAZAR MONGE, 2011).

2.2.2 Sistema de Suministro de Combustibles

El sistema de suministro de combustibles tanto para diesel como para bunker consta de las etapas que se especifican en la Tabla No. 1:

2.2.3 Sistema de suministro de Aceite Lubricante

Los lubricantes son provenientes de Texaco y Shell. Este sistema consta de las etapas que se especifican en la Tabla No. 2:

CAPÍTULO 2.

Tabla 1. Etapas del sistema de suministro de combustible,

Nombre	Descripción
Descarga	El combustible proveniente de la refinería Shushufindi se descarga de los camiones cisterna por medio de dos bombas hacia los respectivos tanques de almacenamiento
Almacenamiento	Se almacena el combustible en dos tanques de igual capacidad, estos se encuentran a 300 m de distancia de la central, en el caso de los tanques de bunker se encuentran equipados con intercambiadores de calor para poder transportar el mismo
Transferencia y almacenamiento intermedio	El combustible es bombeado hasta los tanques intermedios de bunker y de diesel respectivamente, por medio de una línea de transferencia, con la debida instrumentación para mantener este tanque intermedio en los niveles requeridos
Purificación	Se dispone de cuatro purificadoras para bunker y tres purificadoras de diesel que separan los residuos de agua que haya en el combustible y eliminan impurezas, estas purificadoras funcionan de acuerdo el número de motores que se encuentren operando. Los desechos de la purificación toman el nombre de CIENO que son trasladados a un pozo para su posterior venta
Almacenamiento en tanque de servicio y distribución a los motores	Una vez que el combustible ha sido purificado se lo traslada al tanque de servicio que se encuentra ubicado en la parte superior de la sala de máquinas para su distribución a los motores

Fuente: (SALAZAR MONGE, 2011)

Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 2. Etapas del Sistema de suministro de Aceites de Lubricación,

Nombre	Descripción
Descarga y Almacenamiento	El lubricante de Shell es bombeado desde el camión cisterna hasta dos tanques de igual capacidad para su almacenamiento Texaco tiene dos tanques con diferente capacidad el uno es para aceite del sistema y el otro es para aceite de cilindros y reserva de aceite del sistema, que de igual forma son bombeados desde el camión cisterna
Transferencia y almacenamiento intermedio	El lubricante de Shell es trasladado por la línea de transferencia hasta los tanques intermedios
Transferencia al tanque de servicio de aceite de cilindros	En el caso de Shell se bombea el lubricante desde el tanque intermedio, en el caso de Texaco desde el tanque de almacenamiento hasta los tanques de servicio, esto se hace con condiciones de nivel, es decir de acuerdo al nivel requerido para distribuir a los motores (Texaco al No. 1,2,3,4,6 y Shell al No. 5)
Alimentación de aceite al sistema	Se traslada el aceite a los respectivos motores por medios de bombas. El aceite pasa por un intercambiador de calor para eliminar el calor adquirido en el proceso y posteriormente por se le filtra y purifica

Fuente: (SALAZAR MONGE, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

2.2.4 Sistema de generación de vapor

En la central termoeléctrica Guangopolo el vapor tiene varias utilidades. Entre las principales;

CAPÍTULO 2.

- Calentamiento de combustibles (Bunker) antes del ingreso a los motores de combustión interna
- Calentamiento de aceites lubricantes
- Calentamiento del CIENO para facilitar su traslado por las líneas de transmisión
- Limpieza de filtros de aceite primarios y trabajos de mantenimiento

Para que esto se lleve a cabo la producción de vapor de la central consta con un caldero auxiliar que usa como fuente de energía diesel y un caldero regenerativo para cada unidad de generación que usa los gases de escape de las unidades como fuente de energía. Los calderos regenerativos generan vapor cuando las unidades se encuentran en funcionamiento, la caldera auxiliar forma parte del proceso en el momento del arranque para permitir el suministro del combustible adecuado por las líneas de transmisión, (GUANGOPOLO, 2013).

2.2.5 Conversión de energía eléctrica

Es necesario mencionar que el motor de combustión interna se encuentra conectado al generador, mismo que permite que se realice la generación de energía eléctrica por medio de energía mecánica.

Para que se produzca el movimiento giratorio del motor o energía mecánica se debe saber que el principio básico de un motor de combustión interna que es la generación de energía mecánica por medio de la combustión, es decir, de energía calórica. Los procesos que se han mencionado anteriormente permiten que el combustible ingrese al motor se produzca dicha combustión y por tanto se genere la energía mecánica que luego generará energía eléctrica.

2.2.6 Entrega de energía eléctrica

Una vez que el proceso ha sido culminado se procede a entregar la energía eléctrica a la red de transporte. Para realizar esto, la central tiene una estación de transformación, misma que está encargada de elevar el nivel de tensión de 6600 V a 138 KV antes de que ésta sea entregada a la red de transporte y además reduce el nivel de tensión de 6600 V a 380 V, para alimentar los sistemas auxiliares de la central que son los procesos mencionados anteriormente.

Se consta de dos transformadores elevadores y dos transformadores reductores, un elevador y un reductor conectado a tres unidades de generación y los otros dos transformadores conectadas a las siguientes tres unidades de generación y de este punto a la red de transporte de energía eléctrica del sistema nacional interconectado.

2.3 PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA (VILLEGAS MARTINEZ, 2007)

El fin de un motor de combustión interna es el de generar trabajo de manera eficiente para ello éste basa su funcionamiento en el quemado o combustión de aire junto con combustible dentro de una cámara cerrada o cilindro, esto provoca una explosión, misma que permitirá el incremento de presión para que se pueda generar el trabajo.

2.3.1 Principios Termodinámicos

Partiendo del ejemplo que se ilustra en la Figura No. 2 Se puede observar un cilindro el cual contiene combustible mezclado con aire en todo su

CAPÍTULO 2.

volumen, cuando este se calienta aumenta su temperatura y presión de tal manera que se produce una fuerza capaz de mover el pistón hacia abajo. Entonces de aquí obtenemos el principio básico del motor de combustión interna que es el de; permitir el desplazamiento de un pistón para realizar un trabajo, generado por la fuerza producida por la reacción de la combustión de aire y combustible.

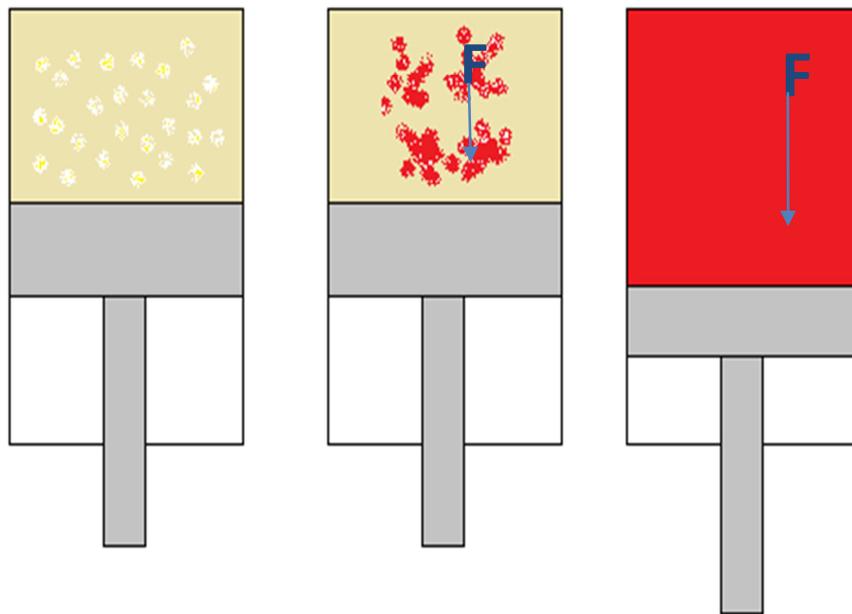


Figura 2. Ejemplo de fuerza producida por la combustión en un cilindro

2.3.1.1 Ciclo del Motor de combustión interna (SALAZAR MONGE, 2011)

Para que la combustión o la explosión se realicen dentro del motor hace falta de otros procesos como; admisión, compresión, expansión y escape, estos permitirán que el combustible y el aire se puedan mezclar y explotar.

CAPÍTULO 2.

Para entender estos procesos es necesario saber las partes del motor, mismas que se detallan en la Figura No. 3:

Los procesos que cumple el ciclo del motor, son los siguientes;

Admisión: este proceso permite la absorción de aire a la cámara de combustión interna, para esto se abre la válvula de admisión y el pistón se desplaza hacia abajo generando un vacío en dicha cámara. De ésta manera se absorbe el aire.

Compresión: este proceso se encarga de comprimir el aire, para esto la válvula de admisión se cierra, y el pistón sube, esto produce un aumento en la temperatura. Cabe recalcar que la válvula de escape se encuentra cerrada.

Inyección y Expansión: este proceso se encarga de inyectar el combustible a la cámara de combustión, por la temperatura que se incrementa en la compresión se produce la inflamación lo que hace que se encienda la mezcla y debido a esto se expanden los gases que ejercen presión sobre el pistón produciendo una fuerza longitudinal que es transmitida al cigüeñal por medio de la biela del motor.

Escape: este proceso permite el escape de los gases producidos en la combustión, para esto la válvula de escape se abre y el pistón se desplaza al punto muerto superior.

Estos cuatro procesos son considerados un ciclo, el cual conforma un bucle de varios ciclos para la generación del movimiento mecánico.

CAPÍTULO 2.

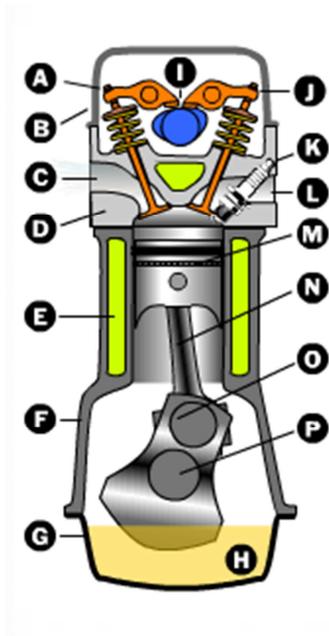


Figura 3. Partes de un motor de Combustión Interna [Imagen de propiedad www.howstuffwork.com]

Donde;

A	Balancín de válvula
B	Tapa de válvulas
C	Pasaje de Admisión
D	Culata de Cilindros
E	Cámara de Refrigeración
F	Bloque de motor
G	Carter de motor
H	Lubricante
I	Eje de Levas
J	Regulador de válvula
K	Bujía de encendido
L	Pasaje de escape
M	Pistón
N	Biela
O	Puño de Biela
P	Cigüeñal

2.3.2 Principios Físicos

Los principios físicos reflejan el mecanismo que el motor emplea para poder realizar el movimiento rectilíneo y transformarlo en rotativo.

La Figura No. 4 señala el mecanismo interno del motor que permite la producción de cada ciclo, para esto podemos observar en la figura que la fuerza que se genera en la expansión hace desplazar al pistón, este movimiento es transmitido a la biela, misma que producirá una fuerza sobre el cigüeñal para que este gire y se produzca el movimiento rotatorio, es decir, energía mecánica.

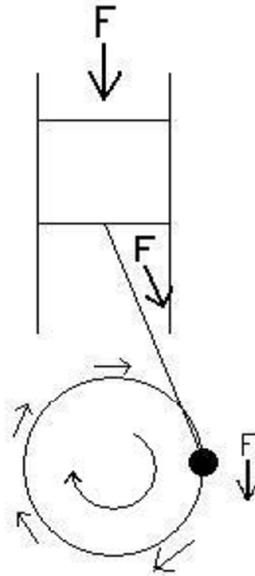


Figura 4. Mecanismo del movimiento lineal – rotativo [Imagen de propiedad Martínez Villegas A.]

El par del motor es considerado como “el trabajo que realiza el motor por cada vuelta que el cigüeñal da sobre sí mismo (Villegas Martínez A.)”. La potencia desarrollada se la considera como; “cantidad de trabajo por unidad de tiempo (Villegas Martínez A.)”.

De estas dos definiciones obtenemos que la potencia es proporcional al par motor y las vueltas que da el cigüeñal por unidad de tiempo, es decir, rpm, lo cual sería lo mismo a; $Potencia = par\ motor \times rpm$.

2.4 GENERADORES (EDUCA, 2012)

Un generador es un dispositivo encargado de transformar el movimiento mecánico o energía mecánica en energía eléctrica, esto lo logra gracias a su principio de funcionamiento que dice que si se tiene un campo magnético el cual genera flujo magnético, se necesita de conductores o espiras por las que

CAPÍTULO 2.

va a circular dicho flujo produciendo una corriente para conseguir generar la fuerza electromotriz resultado de la transformación de energía.

Los generados de la central termoeléctrica son generadores de corriente alterna, es decir, que generan energía eléctrica en forma de corriente alterna. Estos generadores son máquinas sincrónicas que necesitan de una corriente de excitación en el bobinado para generar el campo eléctrico y funcionar. Entonces el principio de funcionamiento de un generador sincrónico es el siguiente;

Para que un generador sincrónico produzca energía eléctrica se necesita de una corriente de excitación (corriente continua) para conseguir un campo magnético el mismo que generará una corriente inducida, ésta será una corriente alterna.

Generalmente el rotor de un generador sincrónico es de polos salientes y de polos lisos, los de polos lisos se utilizan con velocidades entre los 1500 y 3000 rpm y los de polos salientes en velocidades bajas

Elementos principales de un generador síncrono

La estructura básica de un generador está compuesta de los elementos que se muestran en la Figura No. 5 y en la Tabla No. 3.

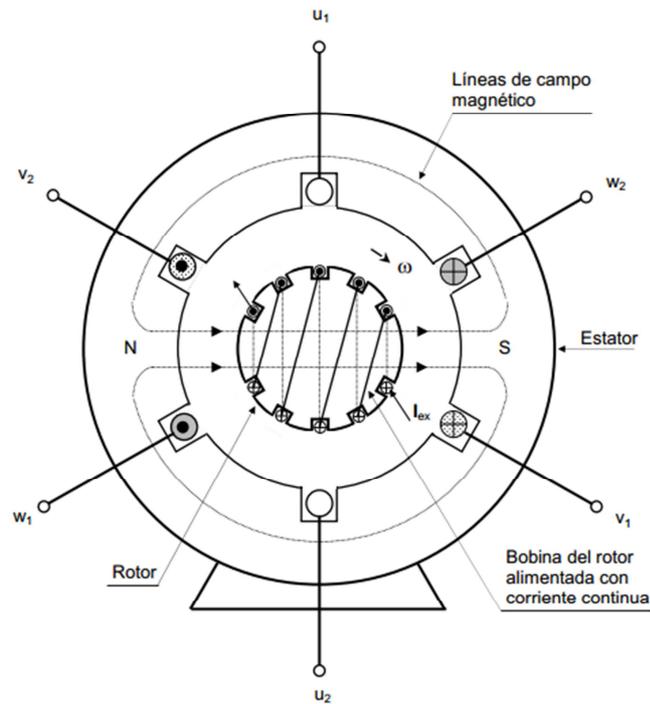


Figura 5. Elementos de un generador síncrono. [Imagen de propiedad: Álvarez 12/09]

Tabla 3. Elementos de un generador

<p>Estator:</p>	<p>Es la parte fija de un generador, está constituido por un grupo de láminas metálicas (conservan el magnetismo) que toman la forma de un cilindro con ranuras longitudinales, sobre las cuales están colocados conductores, conectados entre sí, de forma tal de crear un conjunto de bobinas,</p>
<p>Rotor:</p>	<p>Es la parte móvil del generador, está ubicado en el estator y consiste en un electroimán alimentado por corriente continua que se da a través de un par de anillos rozantes, que permiten la continuidad entre una parte fija y una parte móvil</p>

Fuente: (ALVAREZ, 2009)

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 2.

Una máquina motriz (máquina que impulsa el movimiento) es la que impulsa el giro del rotor, este movimiento generado por el giro produce una velocidad angular que permanece constante, y se mide en revoluciones por minuto. Cada vuelta o giro que dé el motor hace que se cumpla un ciclo completo de la fuerza electromotriz inducida en cada una de las fases del estator, que será realizado en un minuto, si consideramos a “ n_s ” los ciclos por minuto se puede calcular la frecuencia:

—

Donde;

f = frecuencia de la fuerza electromotriz inducida

P = Cantidad de par de polos del generador

n_s = velocidad del giro del motor en rpm

La potencia compleja suministrada por un generador se obtiene a partir del diagrama fasorial del modelo de un generador síncrono con polos saliente que se muestra en la Figura No. 6:

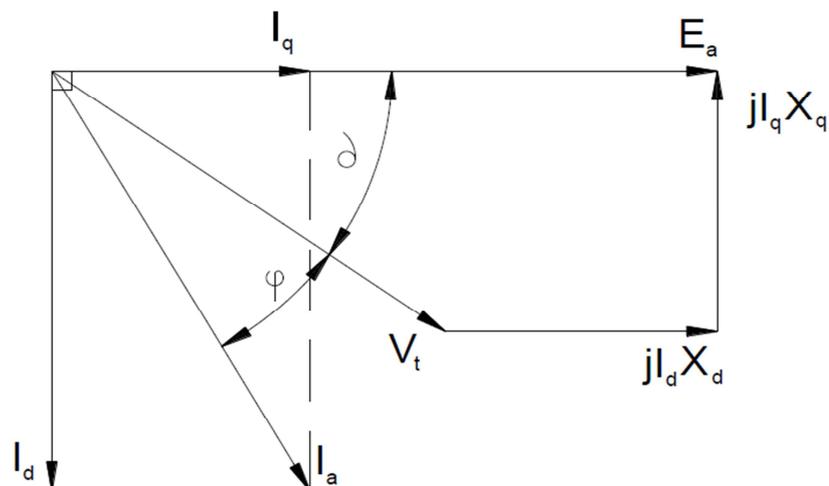


Figura 6. Diagrama fasorial del modelo de un generador síncrono con polos salientes [Imagen de Propiedad Bolaños Mena. 2012]

CAPÍTULO 2.

Entonces la potencia compleja viene dada por:

$$S = P + jQ = 3 * |V_t| * |I_a| * (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad Ec.2$$

De aquí se obtiene la potencia activa y reactiva:

$$P = 3 * |V_t| * |I_a| * \cos \varphi \quad Ec.3$$

$$Q = 3 * |V_t| * |I_a| * \sin \varphi \quad Ec.4$$

2.5 COMBUSTIBLE DIESEL – BUNKER (ROMERO CENTENO C., 2011)

El combustible es un componente o un material que al arder produce calor o energía los mismos que son aprovechables para distintas aplicaciones como el caso de motores de combustión interna que utilizan ésta energía liberada para transformarla en movimiento mecánico

El combustible utilizado en la Central Termoeléctrica Guangopolo es el Diesel y el Bunker, mismos que se describen a continuación:

Diesel

En la C.T. Guangopolo el Diesel es utilizado en el arranque de las unidades generadoras y es un remplazo del bunker en el caso que no se encuentre disponible, además en la industria en general este es utilizado en turbinas a gas, en camiones, tractores, equipos de construcción, etc.

La destilación del petróleo se realiza para separarlo en diferentes fracciones, a partir de aquí se realiza la fabricación del diesel con la elección y mezcla de diferentes fracciones de petróleo que cumplen con ciertas

CAPÍTULO 2.

especificaciones para su elaboración, entonces el diesel es un combustible derivado del petróleo, el cual contiene un alto poder calorífico y excelentes propiedades de combustión, que es de gran utilidad en el funcionamiento de los motores de combustión interna.

Bunker

El bunker es el material combustible que se usa en mayor cantidad en la C.T. Guangolo, principalmente por su bajo costo en comparación con el diesel. Este proviene del Complejo industrial Shushufindi, mismo que es obtenido como residuo de la primera destilación de la refinería, por esta razón se lo conoce como crudo reducido.

El color y la alta viscosidad de este combustible es debido a la reacción de los compuestos químicos que contiene, por esta razón es necesario someter al combustible al calor, es decir debe estar en altas temperaturas para que pueda ser bombeado por la línea de distribución hacia los tanques de servicio de la C.T. Guangopolo.

2.6 SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

Debido a la cambiante demanda que existe en la generación de energía eléctrica, un generador se somete a varios cambios en su potencia, razón por la cual se necesita de un sistema de control de velocidad el mismo que mantenga equilibrada dicha demanda y sus cambios con la generación.

El sistema de control de velocidad también es denominado como el control de potencia activa, debido a que este controla una entrada de energía para una unidad motriz a fin de obtener una determinada potencia. El controlador recibe la señal de velocidad y de potencia y ajusta la entrada de

CAPÍTULO 2.

energía de tal manera que dicha entrada esté de acuerdo con el valor deseado de potencia.

2.6.1 Elementos de un Controlador de Velocidad

Governor

Este es un dispositivo esencial para el control de la velocidad y carga en la máquina motriz, este puede ser un motor, (turbina o alguna otra fuente, en el caso de la C.T. Guangopolo motor de combustión interna). En pocas palabras, este dispositivo es el que permite el movimiento del grupo generador.

Para entender mejor el comportamiento del controlador se realizó el siguiente diagrama de bloques de un sistema de control de velocidad, que se muestra en la Figura No. 7.;

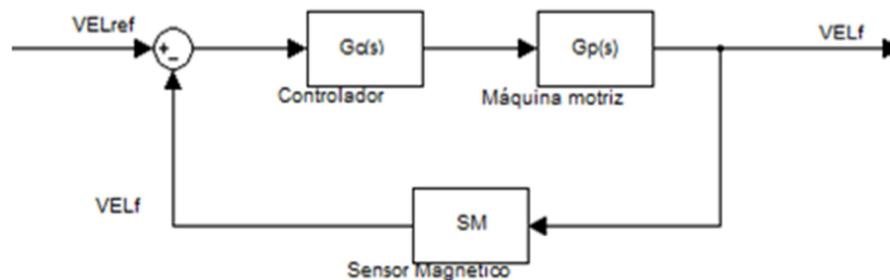


Figura 7. Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad

Donde;

VELref: es el valor requerido al cual debe estar la velocidad de salida

VELf: es la velocidad de salida

Gc(s): es el controlador aplicado

CAPÍTULO 2.

Gp(s): es la planta (máquina motriz)

SM: es el sensor magnético que detecta la velocidad actual

El controlador compara la señal de salida con el valor requerido de velocidad, si la salida permanece constante la inyección de combustible permanece constante, procedimiento que realiza el governor para el control de la velocidad, es decir, abre o cierra las cremalleras de acuerdo al valor requerido. De la misma manera si existe un aumento en la carga el controlador abrirá las cremalleras para aumentar el suministro de combustible y mantener la velocidad en la referencia (la velocidad decae por el aumento de carga), además se realiza una compensación, lo que quiere decir que antes de llegar a la referencia se disminuye el suministro de combustible para que la velocidad no sobrepase el valor deseado, de igual manera si existe una disminución de la carga la velocidad tiende a aumentar por lo que se debe disminuir el suministro de combustible.

Sensor de Velocidad

Se utiliza un sensor magnético el cual es el más utilizado en este tipo de aplicaciones, es de polo simple y entrega una señal de corriente alterna para su lectura

2.7 SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE

El sistema de control de voltaje interviene en el sistema de excitación de la unidad de generación. Un sistema de excitación tiene como función suministrar y ajustar automáticamente la corriente de campo con el fin de mantener la tensión de salida estable, es decir, con un mínimo de variaciones.

Existen algunos factores tales como; falla en el aislamiento del rotor , calentamiento en los devanados del estator, calentamiento durante el periodo

CAPÍTULO 2.

de excitación y calentamiento debido al exceso de flujo, que afectan en el desempeño del generador y en el sistema de excitación, es allí donde el sistema de control interviene, ya que éste se encarga de mantener equilibrada la corriente para que la tensión de la salida no se vea afectado con ningún tipo de variaciones y en el caso de que estas sucedan sean las mínimas posibles. En el sistema de control de excitación se controla voltaje, potencia reactiva y estabilización del sistema. El sistema de control debe responder a las perturbaciones de manera eficiente y el tiempo de respuesta debe ser mínimo para que la capacidad del generador se mantenga.

2.7.1 Elementos de un sistema de excitación (PRABHA, 1994)

Para entender de mejor manera los elementos que tiene y en que trabaja el sistema control de excitación se analiza el diagrama de la Figura No. 8.

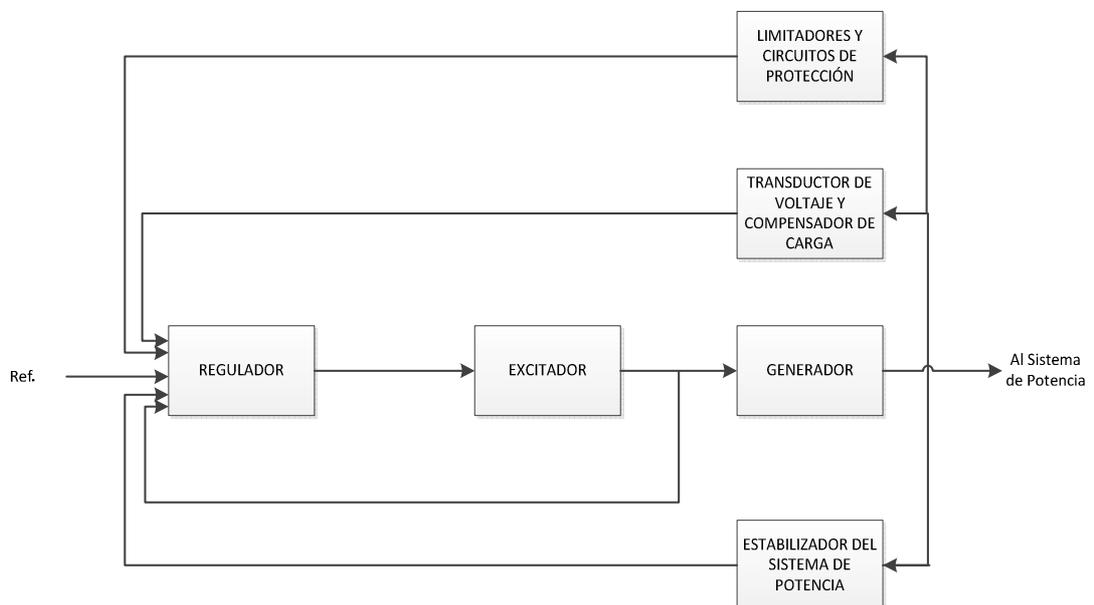


Figura 8. Diagrama del sistema de control de excitación de un generador síncrono

CAPÍTULO 2.

Excitador: provee potencia DC al devanado de campo de la máquina sincrónica, constituye la etapa de potencia del sistema de excitación.

Transductor de Voltaje y compensador de Carga: sensa el voltaje de la salida del generador lo rectifica y filtra a señales DC y los compara con una referencia o set point que representa el voltaje deseado. La compensación de carga permite si se desea mantener la tensión constante en algún punto eléctricamente remoto en el generador, como en el de un transformador

Estabilizador del sistema de potencia: provee una señal adicional al regulador para la reducción de oscilaciones del sistema de potencia. Generalmente las señales de entrada son; desviación de la velocidad del rotor, aceleración de energía y desviación de frecuencia

Limitadores y circuitos de protección: su función es garantizar que los límites de capacidad del excitador y el generador no sean superados, entre otros los limitares son; limitador de corriente de campo, de excitación máxima, de tensión en bornes

Regulador: El regulador procesa y amplifica las señales de control de entrada a un nivel adecuado para el control de excitación

Sistema de Control de Tensión (A.V.R) (BOLAÑOS MENA, 2012)

En el sistema de control de un generador la parte que controla la tensión es conocida también como el lazo de control de la potencia reactiva, debido a que para que el AVR mantenga el estado de tensión constante a la salida del generador, varía la potencia reactiva que entrega o consume del sistema, este lazo se observa en la Figura No. 9:

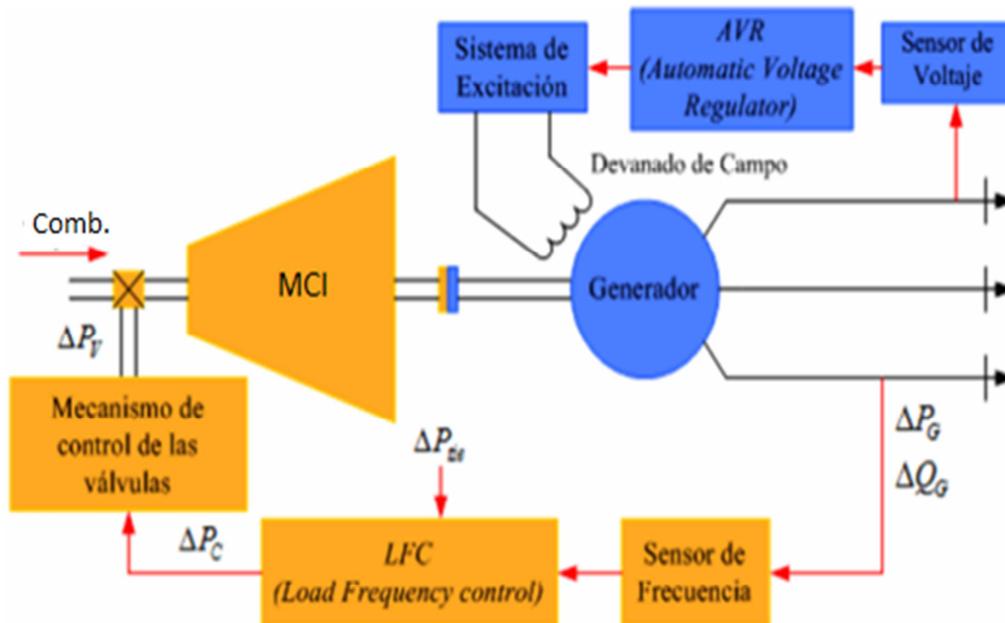


Figura 9. Sistema de control de un generador [Imagen de propiedad Fumagalli L.]

El regulador automático de voltaje (A.V.R) es el encargado de controlar la tensión del estator del generador. Procesa y amplifica las señales de entrada de control a un nivel y forma apropiada para el controlador. En este se encuentra la realimentación y compensación, compara la señal de entrada con un valor de voltaje deseado y lo lleva a la referencia disminuyendo el error que existe entre ellos. Cuando se encuentra en sincronismo con otros generadores en un sistema de potencia este controla el voltaje y la frecuencia.

El AVR controla la potencia reactiva suministrada por el generador de tal que manera que si existe algún evento no planeado o falla (como pequeños cambios de carga), el voltaje de salida sufra de un mínimo de variaciones no significativas y además dependiendo de la falla regula la potencia reactiva de acuerdo a la demanda que ha sido modificada.

2.7.2 Modelo de un A.V.R

En el modelo del A.V.R se debe considerar como primera instancia la respuesta que la salida debe tener, como ya lo explicamos anteriormente este debe controlar la tensión de salida del generador, mantener los valores de voltaje deseados y con un mínimo de variaciones en caso de falla, debido a esto se necesita que la respuesta tenga un tiempo mínimo de respuesta, sea estable y siempre se mantenga en un error tendiente a cero, es por esto que el control adecuado es un controlador PID, en el que su función de transferencia es;

Donde;

K_p : es una ganancia proporcional ajustable

T_i : es el tiempo integral, que ajusta la acción integral

T_d : constante de tiempo derivativo, que hace más rápida la acción de control

El controlador aplicado al generador se vería como en el diagrama de la Figura No. 10

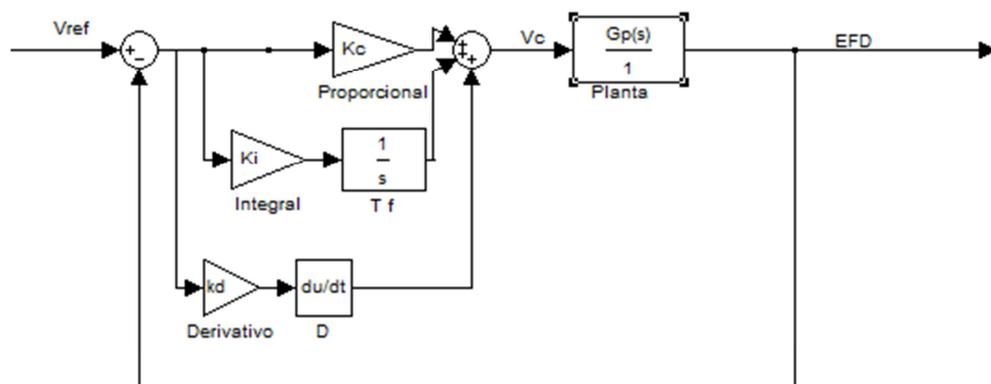


Figura 10. Controlador PID del AVR

Donde;

V_{ref} : es el valor requerido al cual debe estar la tensión de salida

E_{FD} : es el valor de tensión de salida

V_c : es el valor de salida del controlador a la planta

$G_p(s)$: es la planta (generador)

Por tanto la función de transferencia en lazo abierto es;

$$L(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} * G_p(s) \quad Ec.6$$

Y la función de transferencia en lazo cerrado es;

$$\frac{V_{ref}}{V_f} = \frac{L(s)}{1 + L(s)} \quad Ec.7$$

2.8 FALLAS EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO (SANCHEZ IÑIGUEZ D., 2007)

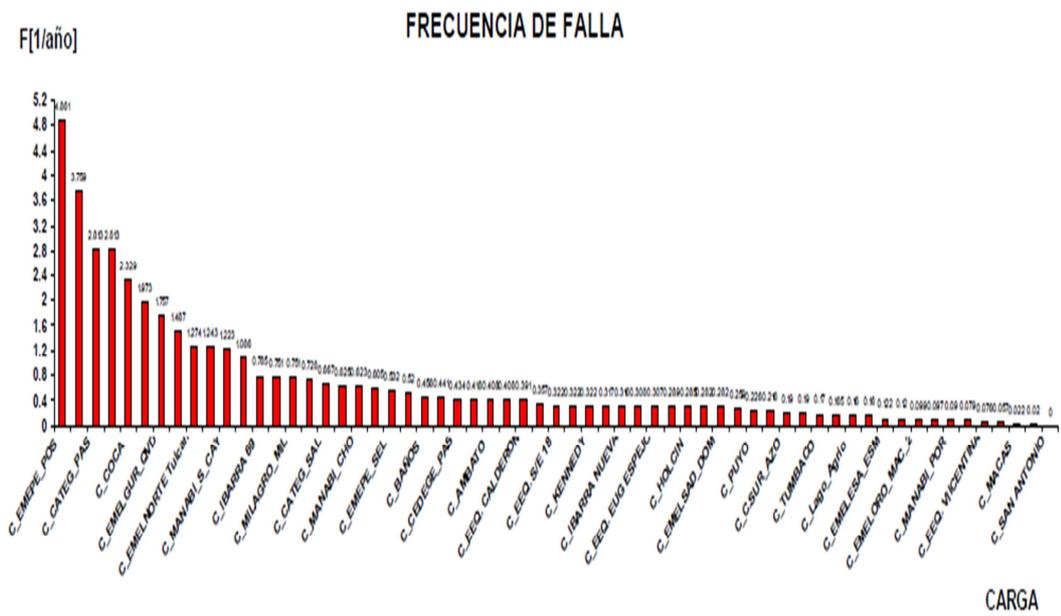
El Sistema Nacional Interconectado (SNI) comprende el sistema de generación y el sistema de transmisión de energía eléctrica. La función del Sistema Nacional Interconectado es generar la suficiente cantidad de energía para transportarla y satisfacer a los puntos de carga.

La confiabilidad del SNI está altamente ligada a la capacidad de respuesta frente a eventos no planeados, y la garantía que ofrece en cuanto a calidad, cantidad y seguridad de energía eléctrica en el caso de que se

CAPÍTULO 2.

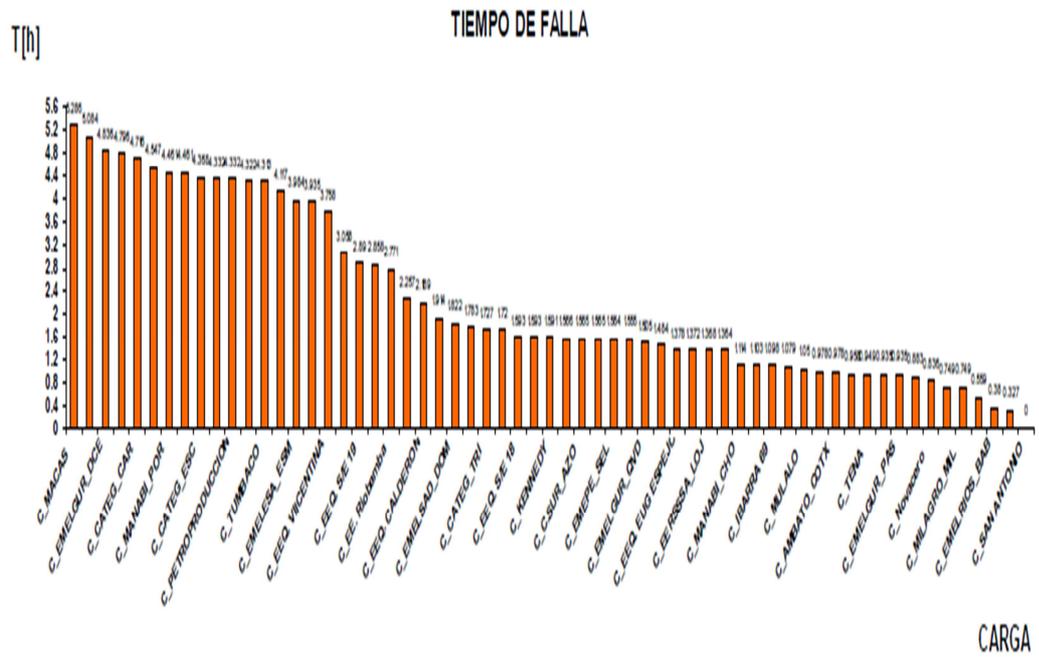
suscitaran dichos eventos. Según un estudio realizado en una tesis de la confiabilidad del SNI en el año 2007, el porcentaje de no suministro de energía en ese año fue del 0.02% de la demanda anual de ese año, es decir, alrededor de 3 GWh/año. Para el año 2012 se estima que éste índice se redujo al 0.012% de la energía no suministrada.

Lo mencionado anteriormente nos dice que la confiabilidad del SNI aproximadamente es de un 99,98%, es decir que las fallas que se podrían presentar serían de un 0.12% aproximadamente en un año, esto quiere decir que no se suministraría energía en un 0.12% anual, motivo por el cual se debe prever y prevenir estos acontecimientos tanto en los sistemas de generación como en los sistemas de transmisión. En la Figura No.11 Se observa la estimación de la frecuencia de fallas y el tiempo de fallas en el 2012



(a)

CAPÍTULO 2.



(b)

Figura 11. Gráfica de estimación de fallas del SNI en el año 2012 (a) Frecuencia de fallas (b) Tiempo de fallas [Imagen de propiedad Sánchez Iñiguez, Tates Simbaña]

CAPÍTULO 3.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN

3.1 COMPONENTES DE LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN

En cada unidad de generación se dispone de diversos componentes para que la generación de energía eléctrica y los procesos que en ella intervienen sean eficientes, a continuación se enlistaran cada uno de ellos y el detalle de los mismos;

3.1.1 Sistema Motor

El motor de combustión interna es el encargado de transformar la energía de combustión en energía mecánica (movimiento rotatorio), el motor de la UG4 se puede observar en la Fotografía No. 1.



Fotografía 1. Motor de Combustión Interna Unidad 4 de generación de la C. T. Guangopolo

El motor de la unidad 4 es un motor de 4 tiempos a diesel, que está diseñado con un émbolo de tipo faldilla, sus características se pueden observar en la Tabla No. 4.

Las dimensiones de algunos elementos del motor de combustión de la unidad 4 se encuentran detalladas en la Tabla No. 5.

Actualmente se utiliza un gobernador de la marca Woodward tipo UG – 40 que se puede observar en la Fotografía No. 2, y cuyas características se muestran en la Tabla No. 6.

CAPÍTULO 3.

Tabla 4. Características del motor de combustión interna de la unidad 4 de generación

Fabricante:	MITSUBISHI MAN
Modelo:	V9V 40/54 TURBOALIMENTADO
Capacidad:	7,314 P ₁ S ₁ = 5,200 Kw
Rendimiento:	17 kWh/gal
Radio de Compresión	1:12,12 Cilindro Principal 1:12,43 Cilindro Secundario
Temperatura de Escape:	391 °C
Aire de entrada:	16 °C
Arranque:	Por aire comprimido
Combustible:	Bunker – Residuo – Diesel
Protecciones:	Falla de arranque, parada de emergencia, baja presión de aceite lubricante, baja presión de aceite turboalimentador, alta temperatura de agua de cilindro, alta temperatura de aceite lubricante, alta temperatura de cojinetes de motor, parada
Combustible de trabajo:	Bunker – Residuo
Combustible de arranque y parada motor:	Diesel
Tipo:	Designación de Cilindros en V
Principio termodinámico:	4 tiempos
Diámetro interior del cilindro [cm]:	40
Carrera del pistón [cm]:	54
Nro. De Cilindros:	18
Inclinación de cilindros:	22,5°
Nro. Válvulas de escape:	2 por cilindro
Nro. Válvulas de admisión:	2 por cilindro
Nro. Máximo RPM en operación	400 RPM
Orden de encendido:	1 – 11 – 2 – 13 – 4 – 15 – 6 – 17 – 8 – 18 – 9 – 16 – 7 – 14 – 5 – 12 – 3 – 10

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 5. Dimensiones del motor de combustión interna de la unidad 4 de generación

Embolo Biela:	3330 mm
Longitud de Biela maestra:	1310 mm
Longitud de Biela secundaria:	1310 mm
Diámetro cilindro:	400 mm

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 6. Características del governor actual de la C.T. Guangopolo UG – 40

Fabricante:	WOODWARD
Modelo:	TIPO UG – 40
Capacidad máx.:	85 J(63 lb-pie)
RPM:	300 a 1000 rpm, bomba de baja velocidad 600 a 1300 rpm, bomba de alta velocidad

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto



Fotografía 2. Governor de la unidad 4 de generación

3.1.2 Sistema de suministro de combustible (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

El sistema de suministro de combustible se encarga de proveer a los motores del combustible necesario tanto de bunker o diesel para que cumpla sus funciones

CAPÍTULO 3.

Los proveedores de bunker y diesel es la refinería Shushufindi, las propiedades del combustible se describen en la Tabla No. 7;

Tabla 7. Propiedades de los combustibles Diesel y Bunker,

Propiedades	Bunker	Diesel
Número de átomos de carbono por molécula	C25 – C35	C15 – C23
Densidad	0,96 – 0,99 g/cm ³	0,9 g/ml
Punto de ebullición	370 °C	150 °C
Calor específico	10000 Cal/Kg	11000 Cal/Kg
Viscosidad	300 800 cSt	2.0 – 4.0 cSt

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

3.1.3 Sistema de suministro de aceite lubricante

El sistema de suministro de aceite lubricante es el encargado de proveer el aceite para el sistema y demás componentes de la central como válvulas y cilindros, etc.

Los proveedores del aceite lubricante son Texaco y Shell, las características se describen en la Tabla No. 8.

Tabla 8. Características de los aceites lubricantes, (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Proveedor	Tipo	Descripción
Texaco	ARGINA XL40	Lubrica la unidad No. 5 tanto para sistema como para cilindros
Shell	TARO 40 XL40	Lubricación de cilindros
	TARO 20 DPX40	Lubricación del sistema

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

3.1.4 Sistema de producción de vapor

Este sistema se encarga de la producción de vapor para varios procesos que requieren calentamiento de combustible, aceite lubricante y agua. Para la producción del vapor se utiliza de un caldero auxiliar que genera y seis calderos regenerativos que generan una producción de 600 Kg/hora y para que el vapor sea distribuido se usa tubería de diferente diámetro según su destino

3.1.5 Sistema de tratamiento de agua para enfriamiento

Este sistema es el encargado de acondicionar el agua para que los procesos que la utilizan dentro de la generación eléctrica funcionen adecuadamente, para esto se utiliza algunos químicos como los que se observa en la Tabla No. 9.

Tabla 9. Químicos utilizados en el tratamiento de agua

Químico	Función
Hipoclorito de sodio al 10%	Elimina bacterias
Policloruro de aluminio	Agrupar impurezas
Ácido sulfúrico al 25%	Regeneración de resinas en la torre catiónica
Sosa cáustica al 25%	Regeneración de resinas en la torre aniónica

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

3.1.6 Sistema Generador

El motor de la unidad de generación se encuentra acoplado al generador de dicha unidad para la transformación de energía mecánica a energía eléctrica.

Para que la energía eléctrica sea distribuida, ésta primero pasa a una estación transformadora en la que el voltaje se eleva de 6600 V a 138000 V, este es denominado transformador de potencia y los transformadores auxiliares son utilizados para reducir el voltaje de 6600 V a 380 V.

La central consta de dos transformadores de servicio y dos transformadores auxiliares, mismos que elevan y reducen la energía para transportarla a las subestaciones de distribución y para alimentar los sistemas auxiliares de la central respectivamente.

Finalmente se debe mencionar que, para que las unidades de generación se encuentren conectadas al sistema nacional interconectado, las unidades deben operar en paralelo, esto quiere decir que la frecuencia, el voltaje y los ángulos de fase de las máquinas deben coincidir unas con otras, para ello se deben cumplir las siguientes condiciones:

CAPÍTULO 3.

- “Las revoluciones por minuto deben estar igualadas, (GRIJALVA AGUAS H., 2005)”.
- “Los voltajes deben estar equilibrados y esto se logra por medio del potenciómetro de ajuste de voltaje, (GRIJALVA AGUAS H., 2005)”.
- “Utilizando el sincronoscopio se debe colocar los ángulos de fase de voltaje en una fase, tomando en consideración los dos puntos anteriormente mencionados, (GRIJALVA AGUAS H., 2005)”.

Características del sistema de generación:

En la Tabla No. 10 se puede observar las características principales de los principales componentes del sistema de generación.

Tabla 10. Características de las partes del sistema de generación

	Generador de Imanes Permanentes	Excitatriz	Generador sin escobillas
Tipo	E-AFP	E-AA	LEK-AF
Potencia de Salida [KVA]	1.5	65	6500
Velocidad [RPM]	400	400	400
Frecuencia [Hz]	60	53.3	60
Voltaje [V]	105	95	6600
Voltaje de excitación [V]		85,4	84
Corriente [A]		395	569
Corriente de excitación [A]		13	422
# Fases	3	3	3
# Polos	16	16	18
Factor de potencia	0.9	0.9	0.8

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
Elaborado por: Autores del proyecto

3.2 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD 4 DE GENERACIÓN

El funcionamiento en general de la unidad 4 de generación y de la demás unidades se describe en la sección de los procesos básicos de una central termoeléctrica en el capítulo 2.

Ésta sección contiene la descripción más a detalle del sistema de generación, en donde se ve incluido el sistema de control de voltaje y velocidad

A partir del esquema que se muestra en la figura No. 12. se analiza el actual funcionamiento de la unidad 4 de generación.

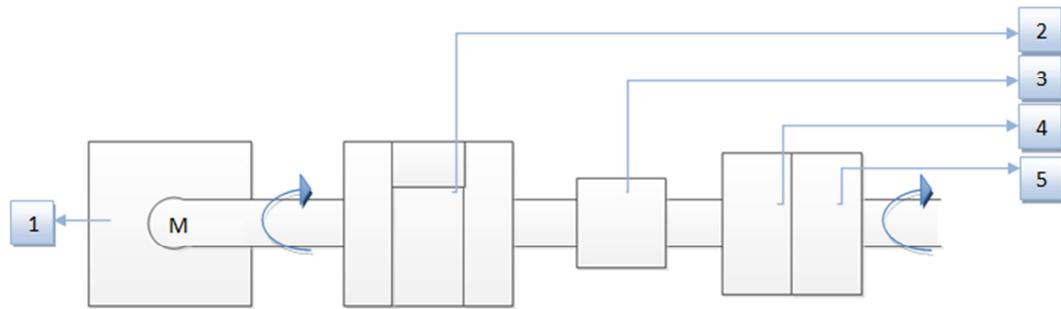
En el esquema de la figura No. 12 podemos observar los elementos que intervienen en el sistema generador como el motor, el generador sin escobillas que ya hemos mencionado anteriormente. El cojinete del generador y el generador de imanes permanentes corresponden a las siguientes funciones:

Cojinetes del Generador:

Son los elementos que sirven como punto de apoyo de ejes y árboles para sostener su peso, guiarlos en su rotación y evitar deslizamientos

Generador de imanes permanentes:

Es un generador síncrono que suministra un campo de excitación constante y que se construye con imanes permanentes en lugar del bobinado de excitación, generalmente en el rotor. Se lo utiliza para alimentar los reguladores que son parte de la excitación de los generadores síncronos que en el caso de la C.T. Guangopolo es sin escobillas.



- 1 Motor de Combustión Interna
- 2 Generador sin escobillas de C.A.
- 3 Cojinete del generador
- 4 Excitatriz de C.A.
- 5 Generador de Imanes Permanentes

Figura 12. Esquema de funcionamiento de la unidad 4 de generación

Análisis del sistema de control de velocidad y voltaje como parte del sistema generador

Como se observó en el capítulo 2. Acerca del sistema de control de velocidad, lo que se busca es controlar la velocidad del motor de tal manera que la frecuencia alcanzada sea la requerida (60 Hz) para el sincronismo con el SNI, y que ésta se mantenga, aun cuando existiesen perturbaciones. Por este motivo sabemos que el control de velocidad es parte del motor de combustión interna y aunque el motor, el generador y la excitatriz se encuentran en un lazo de control, el sistema de regulación o control de velocidad solo necesita saber la entrada de velocidad y carga.

En el caso del sistema de control de voltaje lo que se busca es que la tensión de salida del generador tenga el mínimo posible de variaciones causados por distintos sucesos como pequeños cambios en la carga o perturbaciones varias. En base al requerimiento del sistema de control de voltaje se sabe que este es parte del lazo de control del generador y la

CAPÍTULO 3.

excitatriz, por tanto este sistema necesita la lectura de señales de entrada de voltaje y corriente de excitación

3.2.1 Sistema de Control de Velocidad (INDUSTRIALES, 2011)

Sin considerar las pérdidas, la potencia entregada por el motor de combustión P_M es igual a la potencia entregada por el generador P_G , lo que permite que el generador gire a una velocidad constante que es la de sincronismo. Como se había mencionado el lazo de control es de la potencia activa que suministra el generador, y ésta a su vez debe satisfacer los requerimientos de potencia demandada, es decir que;

Tomando en cuenta estas consideraciones, la potencia se relaciona con la frecuencia, tal y como se muestra en la Figura No. 13;

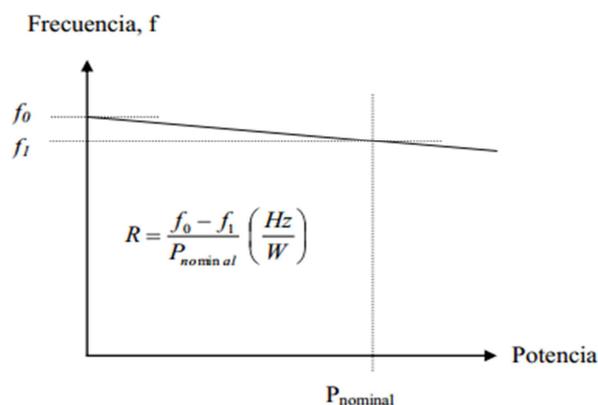


Figura 13. Característica Frecuencia - Potencia [Imagen de Propiedad E.T.S. 2011]

Donde;

R: es la constante de regulación o de estatismo

f_0 : frecuencia eléctrica (60 Hz)

f_1 : frecuencia eléctrica con un mínimo de variación

CAPÍTULO 3.

Siendo R el factor de conversión entre Potencia y frecuencia debido a que ésta expresa la variación de velocidad o de frecuencia que sufre el generador cuando la potencia generada pasa de cero a su valor nominal. Cabe recalcar que este paso de cero a la potencia nominal se da cuando la frecuencia alcanza la velocidad de sincronismo, es decir, cuando la unidad generadora cumple las condiciones de frecuencia y voltaje para funcionar en paralelo.

De esta forma en la siguiente figura determinamos el esquema utilizado para el control de velocidad y carga en la unidad 4 de generación de la C.T. Guangopolo, en la Figura No. 14:

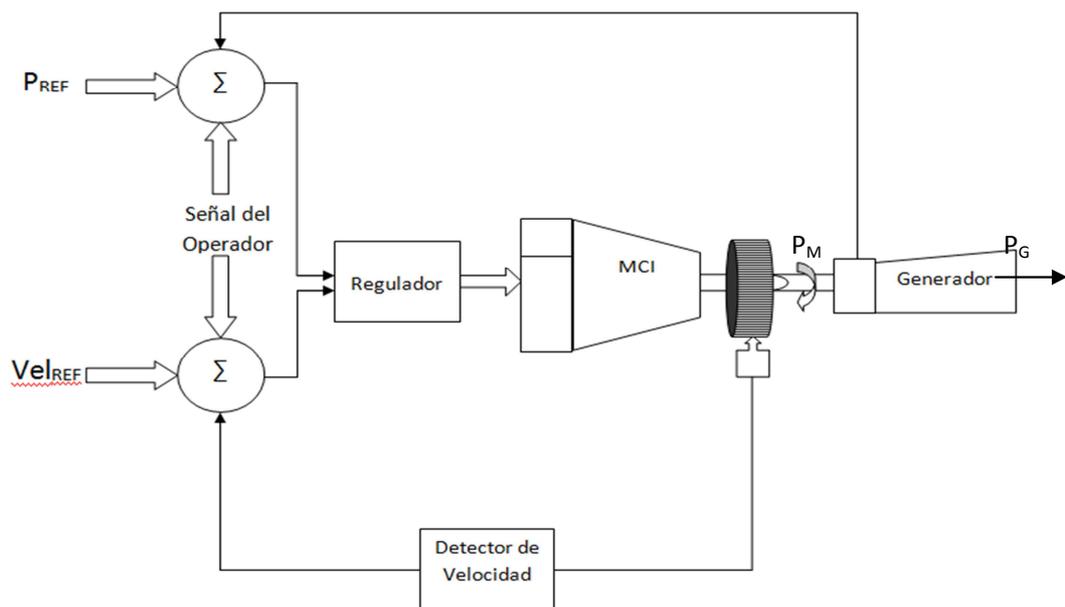


Figura 14. Sistema de control de velocidad manual con el actuador UG - 40

Como se muestra en la Figura No. 14., el control de velocidad es manual debido a que la señal de subida o bajado la da el operador, es decir se ajusta el valor de velocidad de acuerdo al valor requerido por el operador. Con el actual sistema se cumple los requerimientos de producción requeridos con el ajuste de

CAPÍTULO 3.

velocidad establecido, además las limitantes de velocidad para que la máquina no sobrepase los valores predeterminados, son mecánicos es decir dispositivos limitadores de velocidad.

La máquina arranca a una velocidad de 200 RPM manteniendo esta velocidad constante por un periodo de 5 minutos y después de este tiempo alcanza una velocidad de 400 RPM en un tiempo de 7 a 8. Una vez que la máquina ha alcanzado el valor de revoluciones por minuto máximo (400 RPM y una frecuencia de 60 Hz), la unidad ingresa a operar en paralelo y el control actúa sobre la potencia, es decir, que realiza estos ajustes por medio de la señal del operador para valores de potencia, en los cuales también existe un máximo de carga que para la unida No. 4 es de 5000 kW (máximo de carga por cuestiones mecánicas).

Es importante mencionar que una vez que la unidad No.4 se encuentra en paralelo realiza una rampa de carga en diferentes tiempos para que, como se había mencionado en anteriormente en el capítulo 2 sección 2.5, se pueda realizar el cambio de combustible de diesel a bunker, y los tiempos son establecidos para que el motor se vaya adecuando hasta llegar a la carga máxima. Dicha rampa se encuentra establecida en la gráfica de la Figura No. 15. obtenida de los datos del manual de operación de la C.T. Guangopolo, y que actualmente se la realiza manualmente, desde los interruptores de incremento y decremento de potencia ubicados en la sala de control de la central, esto se realiza tanto en el arranque como en la salida de paralelo de la unidad;

CAPÍTULO 3.

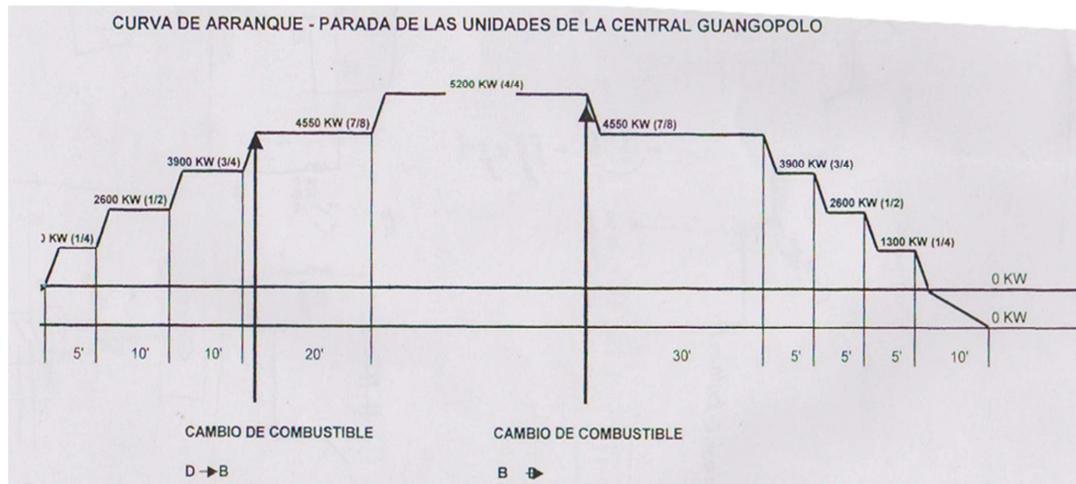


Figura 15. Curva de Arranque - Parada de las unidades de generación de la C.T. Guango

Los planos de la instalación del sistema de control de velocidad implementados por Meidensha (Empresa encargada del diseño, levantamiento y construcción de la central termoeléctrica Guango) se encuentran en el Anexo 6. PLANOS ELÉCTRICOS DEL ANTIGUO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE.

3.2.2 Sistema de control de Voltaje

El sistema de control de voltaje en la unidad UG4 funciona de igual manera que las demás unidades de generación.

Se opera de manera automática y manual, el ajuste de voltaje en modo manual se da por la señal que el operador requiere desde el panel central en la sala de control, el modo automático permite que el voltaje se vaya a la referencia establecida para el funcionamiento normal.

El regulador de voltaje está encargado de controlar la tensión del sistema de excitación en el caso de que existan variaciones en la barra de generación, de tal manera si los niveles de tensión se reducen el control aumenta los reactivos, esto quiere decir que la corriente de campo también debe aumentar,

CAPÍTULO 3.

en el caso de que la tensión aumente su nivel los reactivos deben disminuir y por tanto también la corriente de campo.

Es necesario tomar en cuenta que se tiene establecidos límites de variación de los reactivos, esto es para reducir las pérdidas I^2R y XI^2 a un mínimo práctico y asegurar que el sistema de transmisión opere eficientemente, para la transferencia de potencia reactiva

El diagrama propuesto por la IEEE 421.1 “Definiciones Estándar para sistemas de excitación para máquinas síncronas”, para sistemas de excitación es el que se encuentra en la Figura No. 16.

Simplificando el diagrama de control del sistema, para facilitar el análisis se vería como se muestra en la Figura No. 17.

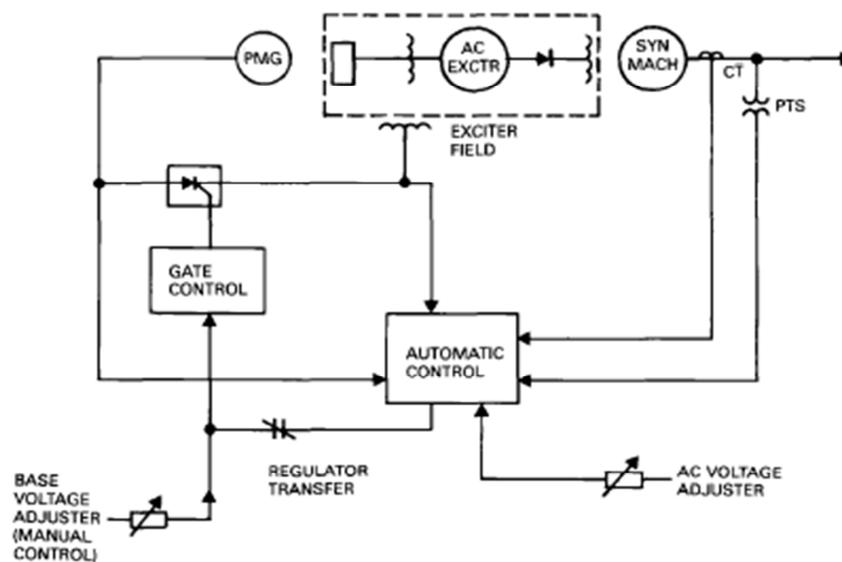


Figura 16. Diagrama del sistema de excitación empleando rectificadores (sin escobillas) [Imagen de Propiedad IEEE 421.1, 1986]

Como se había mencionado para regular el voltaje se manipula la señal de la potencia reactiva, como se puede observar en la Figura No. 17., este

CAPÍTULO 3.

control lo realiza de manera manual el operador por medio de interruptores de doble selección ubicados en la sala de control, por medio de los cuales se da la señal de aumento o disminución de los valores de la potencia reactiva para compensar o regular los valores de voltaje, que en el caso de la unidad No.4 estos valores generalmente no sobrepasan los 2000 KVar

Es por esta razón que los operadores se encuentran en constante supervisión de los datos y cambios que se puedan dar en las unidades de generación para reaccionar frente a cambios inesperados y mantener la tensión de salida o la tensión generada en el valor establecido de demanda 6600 V.

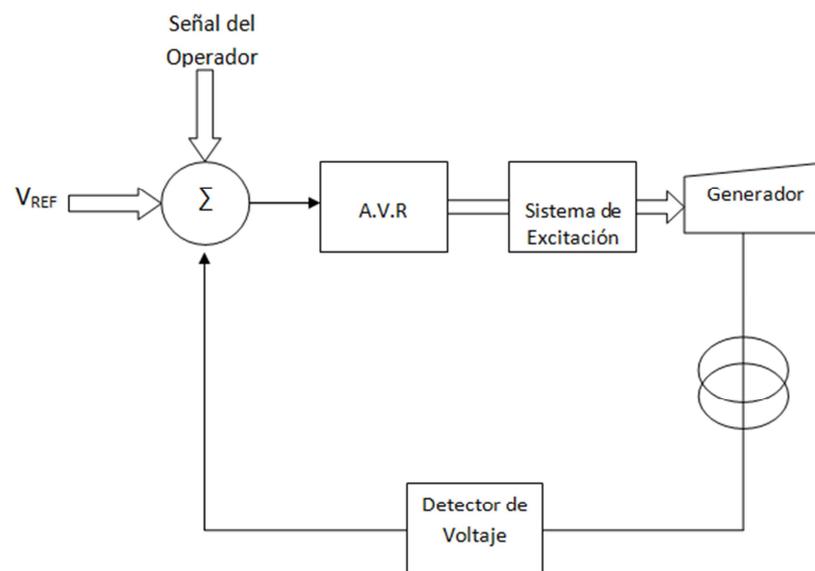


Figura 17. Diagrama del sistema de control de voltaje de la unidad No. 4

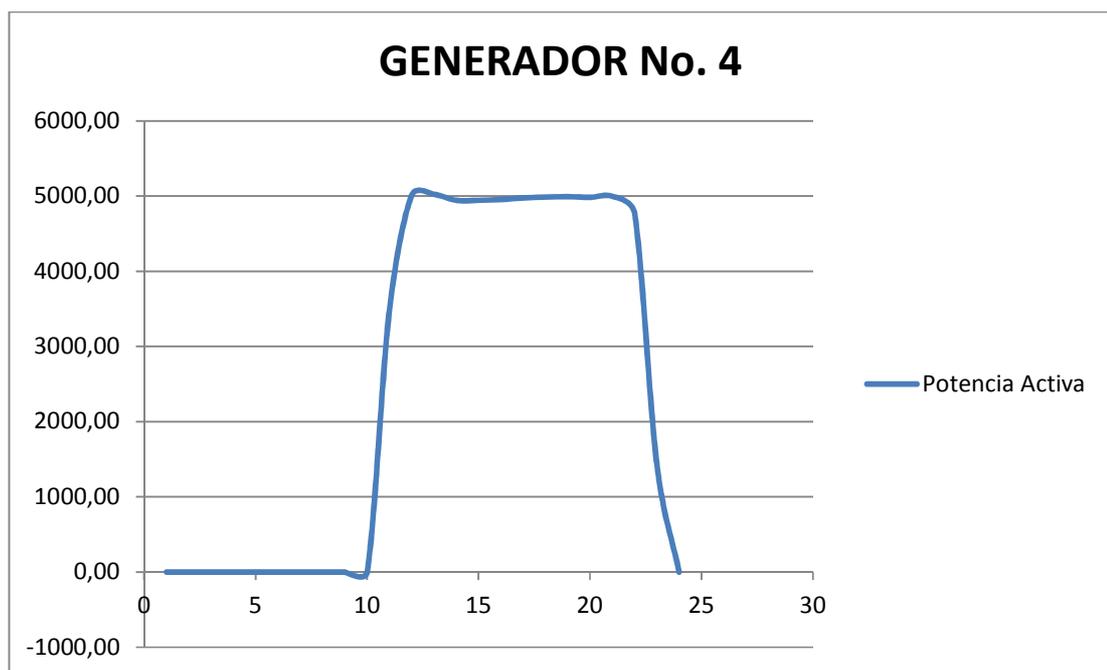
Los planos de la instalación del sistema de control de voltaje implementados por Meidensha (Empresa encargada del diseño, levantamiento y construcción de la central termoeléctrica Guangopolo) se encuentran en el

CAPÍTULO 3.

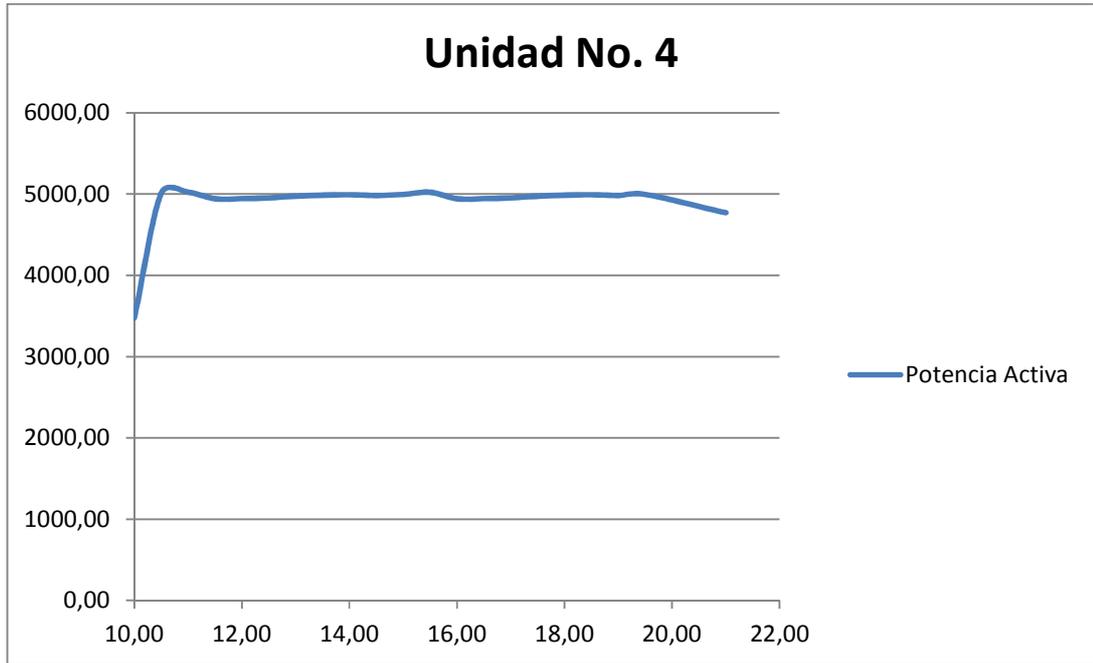
Anexo 6. PLANOS ELÉCTRICOS DEL ANTIGUO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE.

3.3 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE DE LA CENTRAL GUANGOPOLO

Para realizar el diagnóstico del sistema que opera actualmente, es necesario el análisis de las siguientes gráficas que se encuentran en la Figura No. 18. y Figura No. 19., en las que se representa los valores a los que la unidad se encuentra trabajando y la estabilidad que ésta presenta.



(a)



(b)

Figura 18. Curva de Potencia Activa (KW) de la Unidad No.4 (a) Generación en un periodo de 1 día, (b) Acercamiento a la potencia normal de funcionamiento

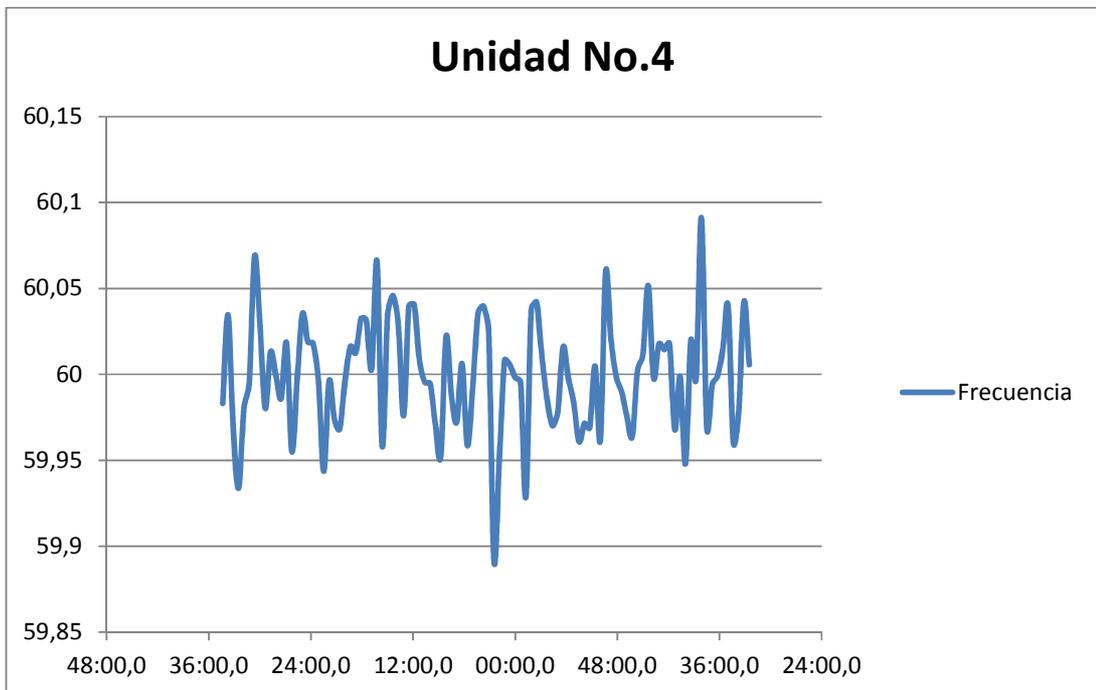


Figura 19. Frecuencia de funcionamiento de la Unidad No. 4

CAPÍTULO 3.

Como se puede observar en las Figura No. 18 y Figura No. 19. las curvas mostradas corresponden a señales de potencia activa y frecuencia que corresponden al lazo del sistema de control de potencia activa, es decir al control de velocidad.

Analizando dichas gráficas nos podemos dar cuenta que efectivamente la frecuencia de funcionamiento es de 60 Hz que corresponde al valor máximo de RPM alcanzados por el motor, sin embargo se puede observar que este valor no es constante y tiene un rango de variación, que hace que la curva sea oscilatoria. El rango de variación de frecuencia no sobrepasa los 0.25 Hz, valor que no es significativo para el correcto funcionamiento en la generación, sin embargo al observar la gráfica de la potencia activa de la unidad No.4 se puede observar un rango de oscilación mayor, este rango es de 100 kW, que representa; en el caso de ser menor a la nominal, pérdidas en la entrega de potencia activa y en el caso de ser mayor a la potencia nominal, posibles fallos o sobrecalentamiento mecánico.

En general, el actual sistema de control de velocidad actúa de manera que la unidad de generación produce la energía demandada, sin embargo, existen pérdidas significativas las cuales se ven reflejadas en el costo del KWh producido mensualmente. Además es importante mencionar que se presenta inexactitud en el cumplimiento de los valores presentados en la rampa de arranque - parada de la unidad, debido a que esto se lo realiza manualmente.

Por otra parte las curvas de voltaje son las que se presenta en las gráficas de la Figuras No. 20 y No. 21.

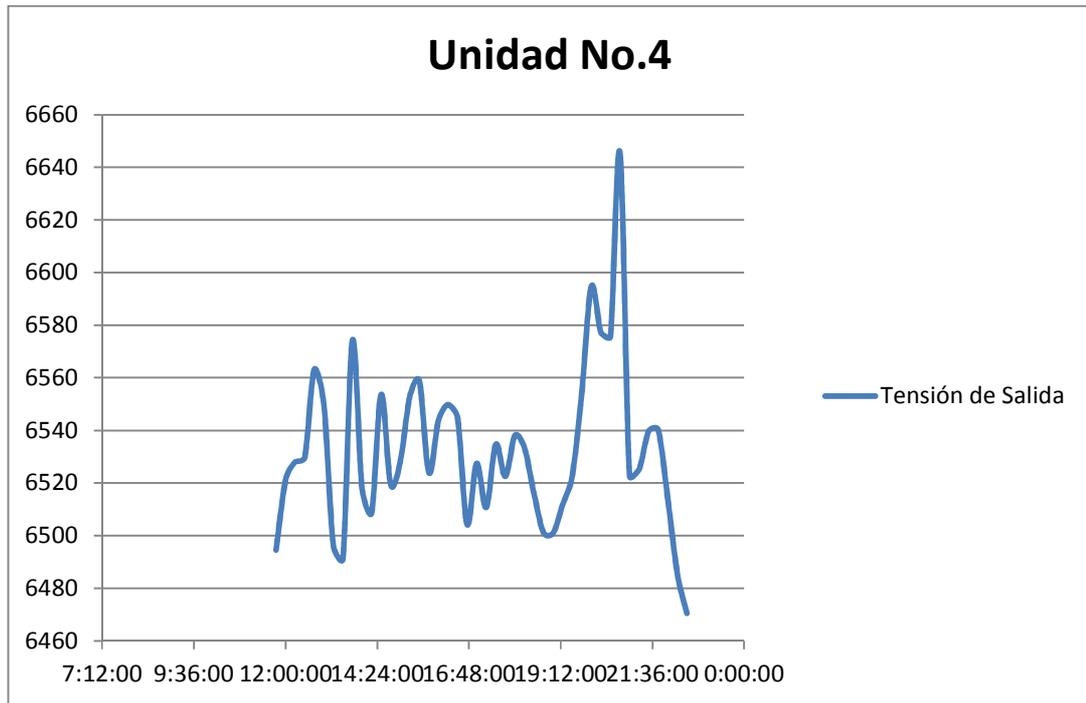


Figura 20. Curva de Tensión de salida, tensión generada

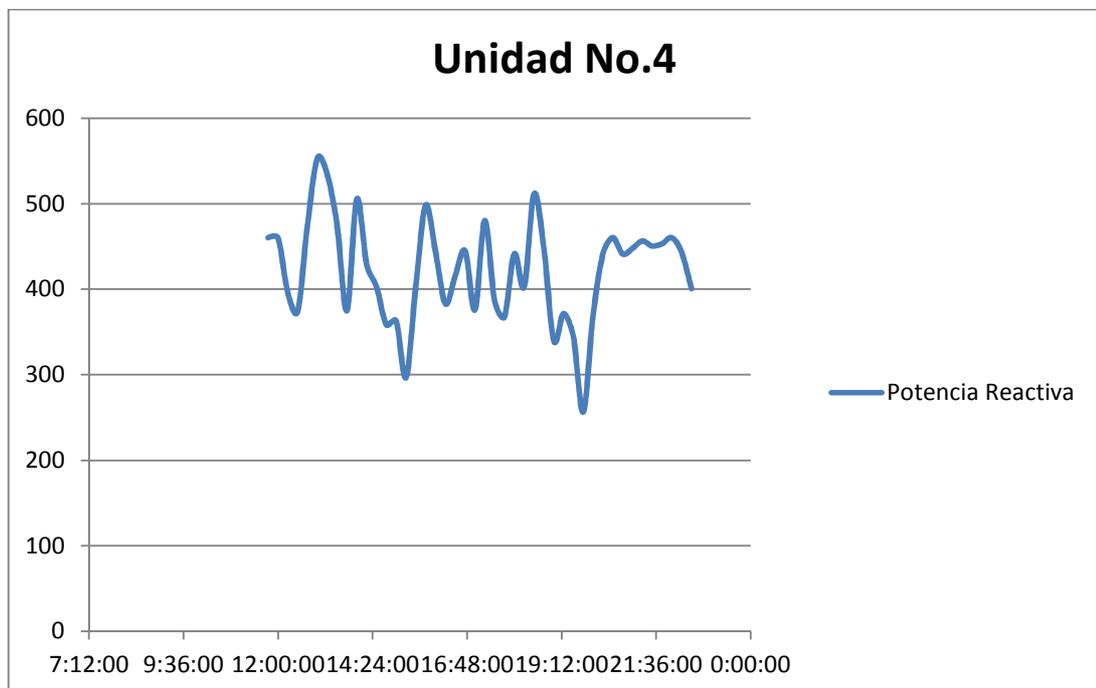


Figura 21. Curva de Potencia Reactiva de la Unidad de generación No.4

CAPÍTULO 3.

Antes de analizar las gráficas anteriores, es importante mencionar que la gráfica de tensión es obtenida de los valores de salida, es decir, los valores de tensión generada, sin embargo es útil para este análisis debido a que es proporcional a la tensión entregada por el AVR al sistema de excitación. Además que los valores de potencia reactiva fueron tomados cuando la unidad se encontraba generando normalmente, es decir a su potencia máxima, los datos de potencia reactiva están dados en kVar.

Al analizar las gráficas de las Figuras No. 20. y No. 21, se puede observar que; empezando por la gráfica de voltaje se tiene oscilaciones por debajo del valor establecido que es de 6600 V, y este rango es de 200 V aproximadamente, en el caso de la gráfica de potencia reactiva se puede observar que las variaciones tienen un rango de 300 kVar aproximadamente.

Esto nos indica que el actual sistema de control de voltaje no permite alcanzar los valores máximos de demanda ya que debido a las oscilaciones presentadas el valor de tensión generada se encuentra generalmente bajo el valor requerido de 6600 V, y que al igual que la potencia activa vista anteriormente esto representa un costo que se ve reflejado mensualmente en pérdidas, no tan significativas pero que se pueden estabilizar.

CAPÍTULO 4.

DISEÑO

4.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

El diseño de un sistema de control adecuado para la unidad 4 de generación de la C.T. Guangopolo requiere de un proceso de identificación, en el que se propone realizar los siguientes pasos con el fin de obtener un modelo apropiado para los propósitos del presente proyecto, (Guillén, 2002);

- Obtención de datos de entrada y salida
- Tratamiento previo de los datos obtenidos
- Elección de la estructura del modelo
- Obtención de los parámetros del modelo
- Validación del modelo

CAPÍTULO 4.

4.1.1 Obtención de los datos de entrada y salida

La información del sistema debe contener datos significativos de tal manera que se debe considerar ciertas características sobre dicha información, como; elección de los correctos datos a ser utilizados, el periodo de muestreo y la cantidad de datos.

Para el sistema de control de velocidad:

La elección de los datos que se van a utilizar se analiza a partir del diagrama de control de velocidad que se muestra en la Figura No. 22.

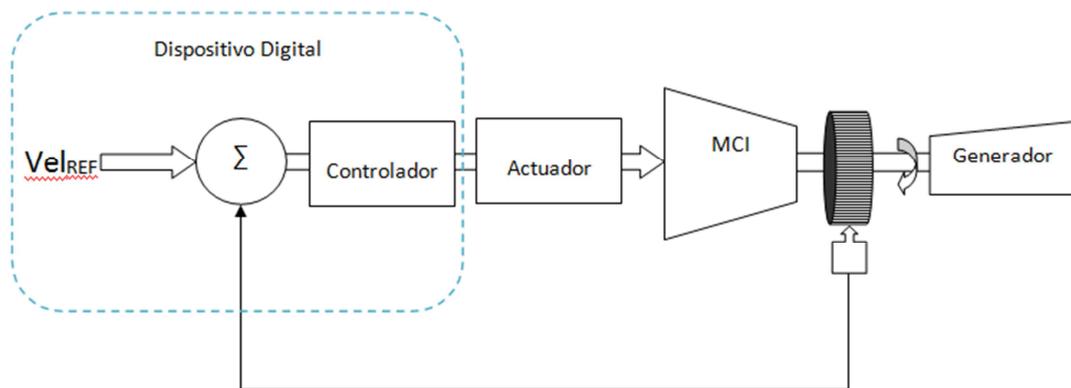


Figura 22. Diagrama de control del sistema de velocidad

Del diagrama de la Figura No. 22. se eligen; la lectura de la señal de entrada de la planta, es decir, del motor de combustión interna, ésta señal es la señal de salida del actuador que representa el flujo de combustible que ingresa al motor, y como salida del sistema el dato es la velocidad del motor (velocidad actual). En el caso de control de velocidad cuando controla potencia la entrada es el flujo de combustible y la salida es la potencia activa del generador (potencia activa actual).

CAPÍTULO 4.

En la Figura No. 23. se puede observar la curva de potencia que la UG4 presenta actualmente. El tiempo que tomó en alcanzar la referencia es de aproximadamente 18 segundos (tiempo de establecimiento), si se sabe que el valor en el tiempo en el cual el sistema alcanza el 63,2% se le conoce como $t_{63,2\%}$, en el actual sistema $t_{63,2\%}$, esto se toma en cuenta para establecer el máximo periodo de muestreo para la obtención de los datos ya que el valor del periodo de muestreo debe ser menor o igual a $t_{63,2\%}$, entonces para el actual caso

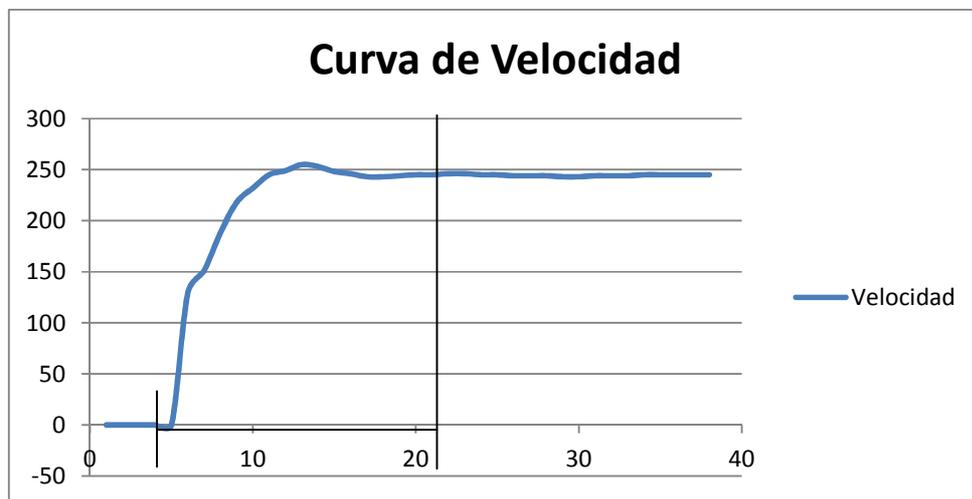


Figura 23. Curva de Velocidad actual de la UG4

Los datos son obtenidos por medio del software Intouch de Wonderware. Para obtener las muestras se consideró un intervalo de tiempo en el que la señal cambia de un valor a otro, es decir, cambia de consigna, tanto en la velocidad y la potencia, para esto se aprovechó las rampas de arranque, es decir, cuando el motor arranca de 0 a 200 RPM y en la potencia de 0 a 5000 KW. En la Tabla No. 11. se indica un resumen de las consideraciones tomadas para los registros de los datos:

CAPÍTULO 4.

Tabla 11. Consideraciones para la elección de datos de la unidad 4 de generación del sistema de control de velocidad

Periodo de muestreo	1 seg.
Cantidad de muestras	201
Fuente	C.T. Guangopolo

Elaborado por: Autores del proyecto

Para el sistema de control de voltaje:

La elección de los datos que se van a utilizar se analiza a partir del diagrama de control de voltaje de la Figura No. 24.

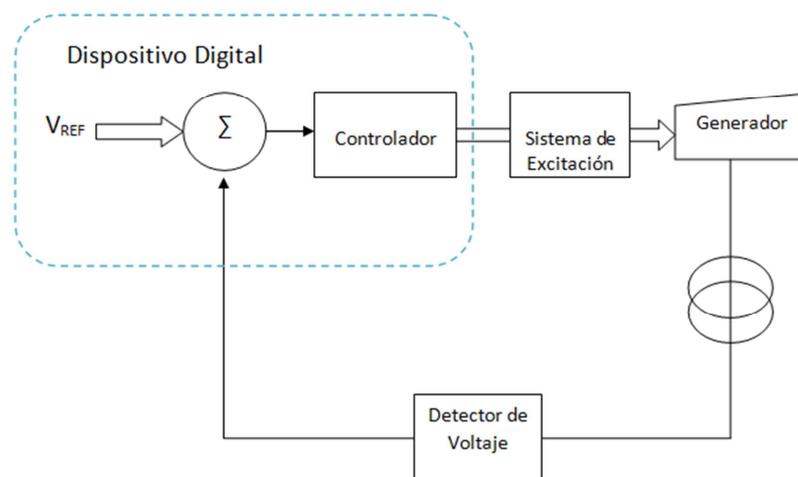


Figura 24. Diagrama de control del sistema de Voltaje

Del diagrama de la Figura No. 24. se eligen; la lectura de la señal de entrada de la planta, es decir, del sistema de excitación, ésta señal es la señal de salida del controlador que representa la corriente de excitación, y como salida del sistema el dato es el del voltaje de excitación (voltaje actual de excitación).

CAPÍTULO 4.

En la Figura No. 25. se puede observar la curva del voltaje del generador que la UG4 presenta actualmente. El tiempo que tomo en alcanzar la referencia es de aproximadamente 12,5 segundos (tiempo de establecimiento), si sabemos que el valor en el tiempo en el cual el sistema alcanza el 63,2% se le conoce como t_c , en el actual sistema t_c , esto se toma en cuenta para establecer el máximo periodo de muestreo para la obtención de los datos ya que el valor del periodo de muestreo debe ser menor o igual a t_c , entonces para el actual caso

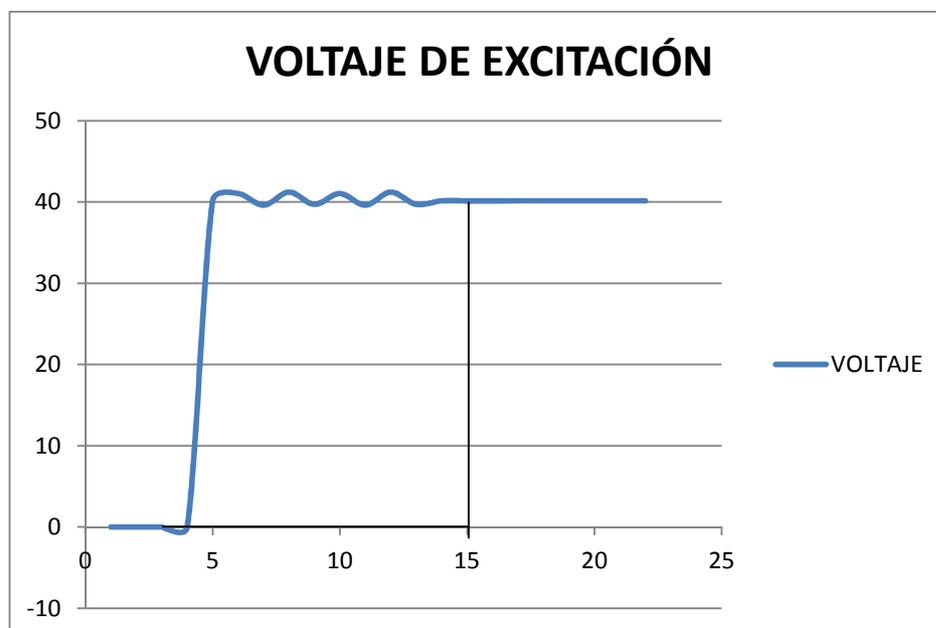


Figura 25. Curva del Voltaje actual de Excitación de la UG4

Los datos son obtenidos por medio del software Intouch de Wonderware. Para obtener las muestras se consideró un intervalo de tiempo en el que la señal cambia de un valor a otro. En la Tabla No. 12 se indica un resumen de las consideraciones tomadas para los registros de los datos.

Tabla 12. Consideraciones para la elección de datos de la unidad 4 de generación del sistema de control de voltaje

Periodo de muestreo	1 seg.
Cantidad de muestras	201
Fuente	C.T. Guangopolo

Elaborado por: Autores del proyecto

4.1.2 Tratamiento previo de los datos obtenidos

En ocasiones los datos que se han obtenido suelen estar acompañados de diversos tipos de perturbaciones o señales basura, las cuales afectan al proceso de identificación, es por esto que se debe preparar los datos para mejorar y facilitar dicho proceso. Esto se logra filtrando ruidos o eliminando componentes de variación lenta

En el registro de los datos obtenidos de la UG4 de la C.T. Guangopolo, se mantienen todos los datos conseguidos debido a que las muestras han sido escogidas en un intervalo de tiempo establecido y no muy largo, razón por la cual se necesitan cada uno de los datos para interpretar correctamente la dinámica del sistema.

Es importante mencionar que para la toma de los datos de entrada y de salida, se consideró el tiempo del intervalo de la señal deseada, para la toma de muestras, es decir, que de acuerdo al tiempo del intervalo mencionado en segundos es el número tomado de muestras, debido a que los históricos de Intouch tiene una limitación de muestras y éstas se toman de acuerdo al periodo de muestreo.

4.2 MODELAMIENTO

4.2.3 Elección de la estructura del modelo (Guillén, 2002)

La elección de la estructura del modelo implica varias consideraciones tales como; si el sistema es invariante en el tiempo y es un sistema causal o no anticipativo, además se debe considerar la estructura de los datos y la secuencia de medidas y evaluación.

Para el caso actual el modelo matemático es de tipo paramétrico debido a que se obtendrá a partir de una función de transferencia. El método de identificación por la secuencia de medidas y evaluación, es decir, por los datos experimentales de entrada y salida obtenidos del grupo generador No.4 es offline, que es un método por el cual se estiman los parámetros del modelo en tiempo discreto a partir de los datos de entrada y salida, entonces en base a lo anteriormente expuesto se plantea el diagrama de la Figura No. 26., del cual se obtendrá la representación matemática del sistema de control en forma discreta;

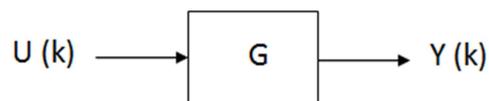


Figura 26. Diagrama de la planta

Para el diagrama de la planta de forma general se expresa la ecuación a diferencias;

CAPÍTULO 4.

Donde;

y: es la salida de la planta.

u: es la entrada de la planta.

De la cual si se extiende la ecuación se obtiene;

$$a_p y(k-p) + \dots + a_1 y(k-1) + a_0 y(k) = b_r u(k-r) + \dots + b_1 u(k-1) + b_0 u(k) \text{ Ec. 9}$$

La propiedad no anticipativa del sistema se la puede demostrar cuando se reescribe la ec. 9 con un estado futuro de la siguiente manera;

$$\begin{aligned} a_n y(k) + \dots + a_1 y(k+n-1) + a_0 y(k+n) \\ = b_m u(k) + \dots + b_1 u(k+m-1) + b_0 u(k+m) \end{aligned} \text{ Ec. 10}$$

De la cual se puede observar que el orden del denominador m no debe ser mayor del orden del numerador n de la función de transferencia.

Si se representa la ec.9 matemáticamente en el dominio de Z se obtiene;

$$a_n z^{-n} y(z) + \dots + a_1 z^{-1} y(z) + a_0 y(z) = b_m z^{-m} u(z) + \dots + b_1 z^{-1} u(z) + b_0 u(z) \text{ Ec. 11}$$

Despejando;

$$y(z)(a_n z^{-n} + \dots + a_1 z^{-1} + a_0) = u(z)(b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0) \text{ Ec. 12}$$

Entonces la función de transferencia general de un sistema es;

$$\frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n z^{-n} + \dots + a_1 z^{-1} + 1} \text{ Ec. 13}$$

CAPÍTULO 4.

Para escoger el orden de la ecuación entre primer y segundo orden se toma en cuenta el que tenga mayor rapidez de respuesta frente a un desequilibrio, es por esto que se elige el modelo de segundo orden y de ésta manera la ecuación de transferencia que se utilizará es de la siguiente forma;

$$\frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_0}{a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + 1} \quad \text{Ec. 14}$$

4.2.4 Obtención de los parámetros del modelo (Guillén, 2002)

Se debe realizar la estimación de los parámetros que mejor se ajuste a la respuesta del modelo escogido de acuerdo a la información obtenida de los datos de entrada y salida

Para esto a partir de la Ec. 13 se comenzará con el análisis para aplicar un método de obtención de parámetros adecuado, entonces si reescribimos la Ec. 13 con una representación del polinomio del denominador y del numerador, quedaría de la siguiente manera;

$$G(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_m z^{-m} + \dots + b_1 z^{-1} + b_0}{a_n z^{-n} + \dots + a_1 z^{-1} + 1} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad \text{Ec. 15}$$

De la ecuación Ec. 15 se obtiene;

$$A(z)y(z) = B(z)u(z) \quad \text{Ec. 16}$$

Donde;

A(z): es la representación del polinomio del denominador y

B(z): es la representación del polinomio del numerador

CAPÍTULO 4.

Para volver a la representación de ecuación a diferencias se toma en cuenta la equivalencia en el dominio en Z , con las siguientes ecuaciones como ejemplo;

$$q^{+1}u(k) = u(k + 1) = z^{+1}u(z) \quad \text{Ec. 17}$$

$$q^0u(k) = u(k) = z^0u(z) \quad \text{Ec. 18}$$

$$q^{-1}u(k) = u(k - 1) = z^{-1}u(z) \quad \text{Ec. 19}$$

Entonces la ecuación se reescribiría de la siguiente manera;

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) \quad \text{Ec. 20}$$

La ecuación Ec. 20 se puede reescribir de la forma matricial;

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ y(k-2) \\ \vdots \\ y(k-n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 & \dots & a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k-1) \\ u(k-2) \\ \vdots \\ u(k-m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & b_1 & b_2 & \dots & b_m \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 21}$$

Si de la Ec. 21 se despeja $y(k)$, para obtener la forma de la ecuación de regresión se tiene;

$$y(k) = [y(k-1) \ y(k-2) \ \dots \ y(k-n) \ u(k-n+m) \ u(k-n+m-1) \ \dots \ u(k-n)] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 22}$$

Aplicando el vector de regresión en el instante k (ϕ_i) y el vector de los coeficientes a estimar de la ecuación de regresión, se reescribe la Ec. 22 de la siguiente manera;

CAPÍTULO 4.

$$y(k) = [\phi_1(k) \quad \phi_2(k) \quad \dots \quad \phi_{n+m+1}(k)] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{n+m+1} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 23}$$

Reescribiendo la Ec. 23 para varias muestras;

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \vdots \\ y(k+r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1(k) & \phi_2(k) & \dots & \phi_{n+m+1}(k) \\ \phi_1(k+1) & \phi_2(k+1) & \dots & \phi_{n+m+1}(k+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(k+r) & \phi_2(k+r) & \dots & \phi_{n+m+1}(k+r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{n+m+1} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 24}$$

De donde;

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \vdots \\ y(k+r) \end{bmatrix} = Y$$

$$\begin{bmatrix} \phi_1(k) & \phi_2(k) & \dots & \phi_{n+m+1}(k) \\ \phi_1(k+1) & \phi_2(k+1) & \dots & \phi_{n+m+1}(k+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(k+r) & \phi_2(k+r) & \dots & \phi_{n+m+1}(k+r) \end{bmatrix} = \phi_n$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_{n+m+1} \end{bmatrix} = \theta$$

Para facilitar cálculos posteriores de la Ec. 24, se la reescribe de la siguiente manera;

$$Y = \phi_n \theta \quad \text{Ec. 25}$$

Donde;

ϕ_n : es la matriz de regresión

θ : es el vector de los parámetros del sistema

CAPÍTULO 4.

A partir del diagrama de la Figura No. 26. se obtiene el error residual, es decir el error que se obtiene de la salida calculada y la salida medida experimentalmente;

De la Figura 27. se confirma que el error es la resta de la salida medida y la salida calculada como se expresa en la Ec. 26.

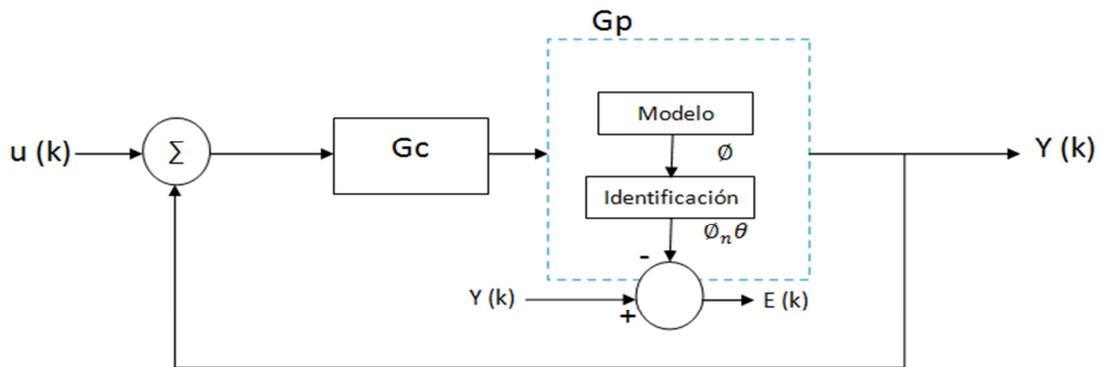


Figura 27. Diagrama de la estimación de parámetros

Se obtiene el valor del error debido a que el método que se va a utilizar para encontrar los parámetros de la función de transferencia del sistema, va a ser el de los mínimos cuadrados simples, el mismo que optimiza la minimización de la función error.

Dados un conjunto de N pares de datos de entrada y salida, como la que se obtuvo en la experimentación.

CAPÍTULO 4.

Y dada la estructura del modelo, pero con parámetros desconocidos, se debe encontrar el vector de los parámetros estimados $\hat{\theta}$, para ello se empieza por la ecuación de la minimización de la suma del cuadrado del error;

$$J_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [e(k)]^2 \quad \text{Ec. 28}$$

Aplicando la Ec. 26 en la Ec. 28, se obtiene;

$$J_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [Y - \phi_n \theta]^2 \quad \text{Ec. 29}$$

La Ec. 28 se la expresa de la forma matricial de la siguiente manera;

$$J_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |E(1) \ E(2) \ \dots \ E(N)| \begin{matrix} E(1) \\ E(2) \\ \vdots \\ E(N) \end{matrix} = E^T E \quad \text{Ec. 30}$$

De aquí se expresa nuevamente la ecuación Ec. 29, de la siguiente manera;

$$J_N(\theta) = [Y - \phi_n \theta]^T [Y - \phi_n \theta] \quad \text{Ec. 31}$$

Desarrollando la ecuación para obtener los parámetros de forma matricial se tiene;

$$J = [Y^T - (\phi_n \theta)^T] [Y - \phi_n \theta] \quad \text{Ec. 32}$$

$$J = Y^T Y - Y^T \phi_n \theta - (\phi_n \theta)^T Y + (\phi_n \theta)^T \phi_n \theta \quad \text{Ec. 33}$$

Sabemos que; $Y = \phi_n \theta$ y $Y^T = (\phi_n \theta)^T$, entonces si esto lo aplicamos en el segundo término de la igualdad;

$$J = Y^T Y - 2(\phi_n \theta)^T Y + (\phi_n \theta)^T \phi_n \theta \quad \text{Ec. 34}$$

CAPÍTULO 4.

Debido a que θ es un vector columna la Ec. 34 se la puede reescribir;

$$J = Y^T Y - 2(\phi_n^T)^T Y + \phi^T \phi \theta^2 \quad \text{Ec. 35}$$

Para optimizar la minimización se realiza la derivada con respecto a θ , así;

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = -2(\phi_n^T)^T Y + 2\phi^T \phi \theta \quad \text{Ec. 36}$$

El mínimo error que se va a presentar será cuando la ecuación Ec. 36 sea igual a cero;

$$-2(\phi_n^T)^T Y + 2\phi^T \phi \theta = 0 \quad \text{Ec. 37}$$

Y de aquí se obtiene el vector buscado para obtener los parámetros del sistema,

$$\theta = \frac{2\phi^T Y}{2\phi^T \phi} = \phi^T Y [\phi^T \phi]^{-1} \quad \text{Ec. 38}$$

Antes de continuar se debe obtener la ecuación a diferencias de la Ec. 14;

$$a_2 y(k-2) + a_1 y(k-1) + y(k) = b_1 u(k-1) + b_0 u(k) \quad \text{Ec. 39}$$

Se debe construir la forma matricial del modelo regresivo, para esto nos basamos en la Ec. 24, y se obtiene,

$$\begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \\ \vdots \\ y(k+201) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(k-1) & y(k-2) & u(k) & u(k-1) \\ y(k) & y(k-1) & u(k+1) & u(k) \\ & & \vdots & \\ y(k+200) & y(k-199) & u(k+201) & u(k+200) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 40}$$

CAPÍTULO 4.

Ahora se debe aplicar los datos de entrada y salida obtenidos experimentalmente en la Ec.38, que debido a la cantidad de muestras obtenidas, esto se lo realiza en Matlab con el modelo ARX, que es un modelo paramétrico que se utiliza para la identificación de plantas en lazo cerrado, offline, el grado de la planta como ya se había planteado anteriormente es de segundo orden que interpretando al modelo de ARX es de orden 221 (modelo ARX221).

En Matlab el proceso de identificación se realiza de la siguiente manera: Para ingresar los datos en Matlab se crean vectores en el directorio, tanto de la entrada como de la salida, esto se lo puede hacer importando los datos .csv o creando nuevas variables como se muestra en la Figura No. 28;

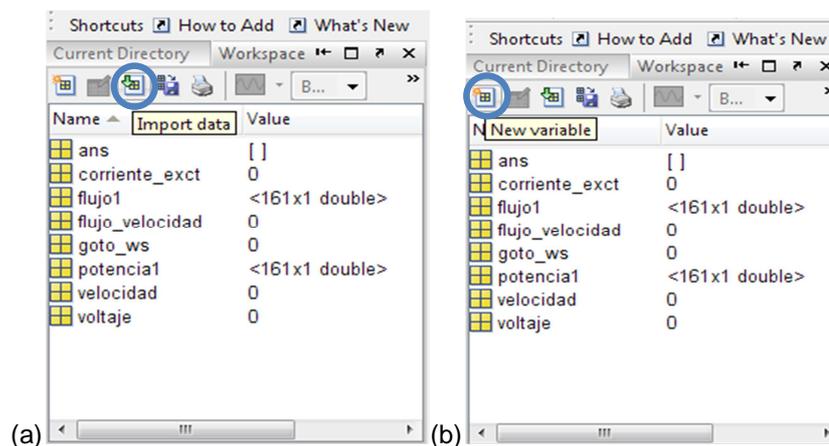


Figura 28. Vectores de Entrada y salida en el directorio de matlab (a) Importar datos en el directorio de matlab (b) Creando una nueva variable en el directorio de matlab

Se crea un objeto de datos que contenga la entrada y la salida, con el comando iddata de Matlab, que crea objetos de datos aptos para rutinas de identificación, de la manera que se muestra en la Figura No. 29

CAPÍTULO 4.

```
>> G_ident=iddata(velocidad,flujo_vel,1)

Time domain data set with 161 samples.
Sampling interval: 1

Outputs      Unit (if specified)
   y1

Inputs       Unit (if specified)
   u1
```

Figura 29. Conversión de vectores de entrada y salida a objeto de datos para la identificación

Donde;

Velocidad: es la variable que representa la salida

Flujo_vel: es la variable que representa la entrada y

1: es el intervalo de muestreo

Una vez que se tiene el objeto de datos, se procede a inicializar la herramienta de Matlab, ident, el cual es un sistema de identificación, se escribe la palabra ident en la consola de Matlab para inicializar esta herramienta, como se muestra en la Figura No. 30.

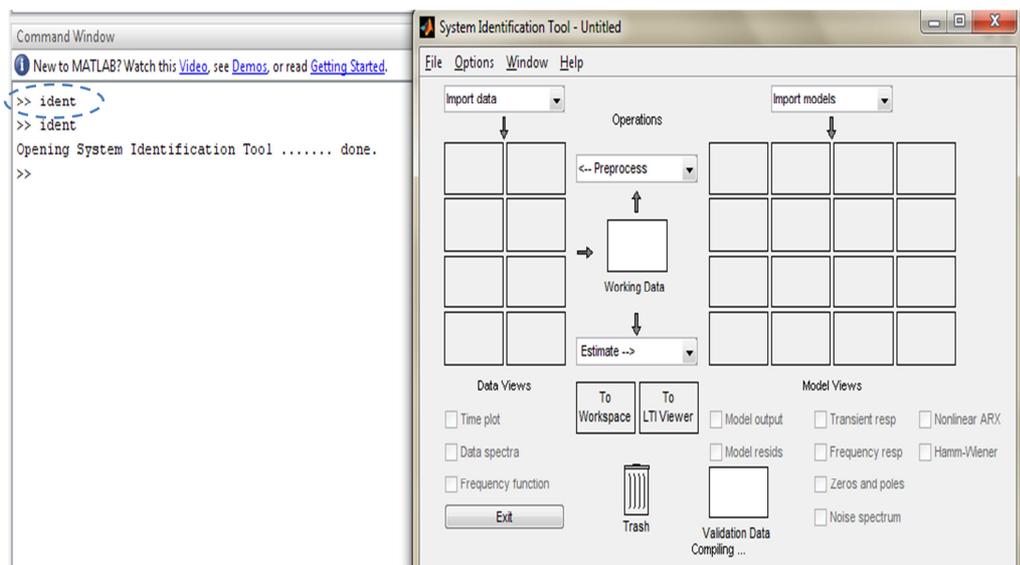


Figura 30. Sistema de Identificación de matlab

CAPÍTULO 4.

Seguido de esto se importa el objeto de datos, para ellos se selecciona Data object, en la lista de importación de datos, se escribe el nombre del objeto creado y se da clic en import, tal como se muestra en la Figura No. 31.

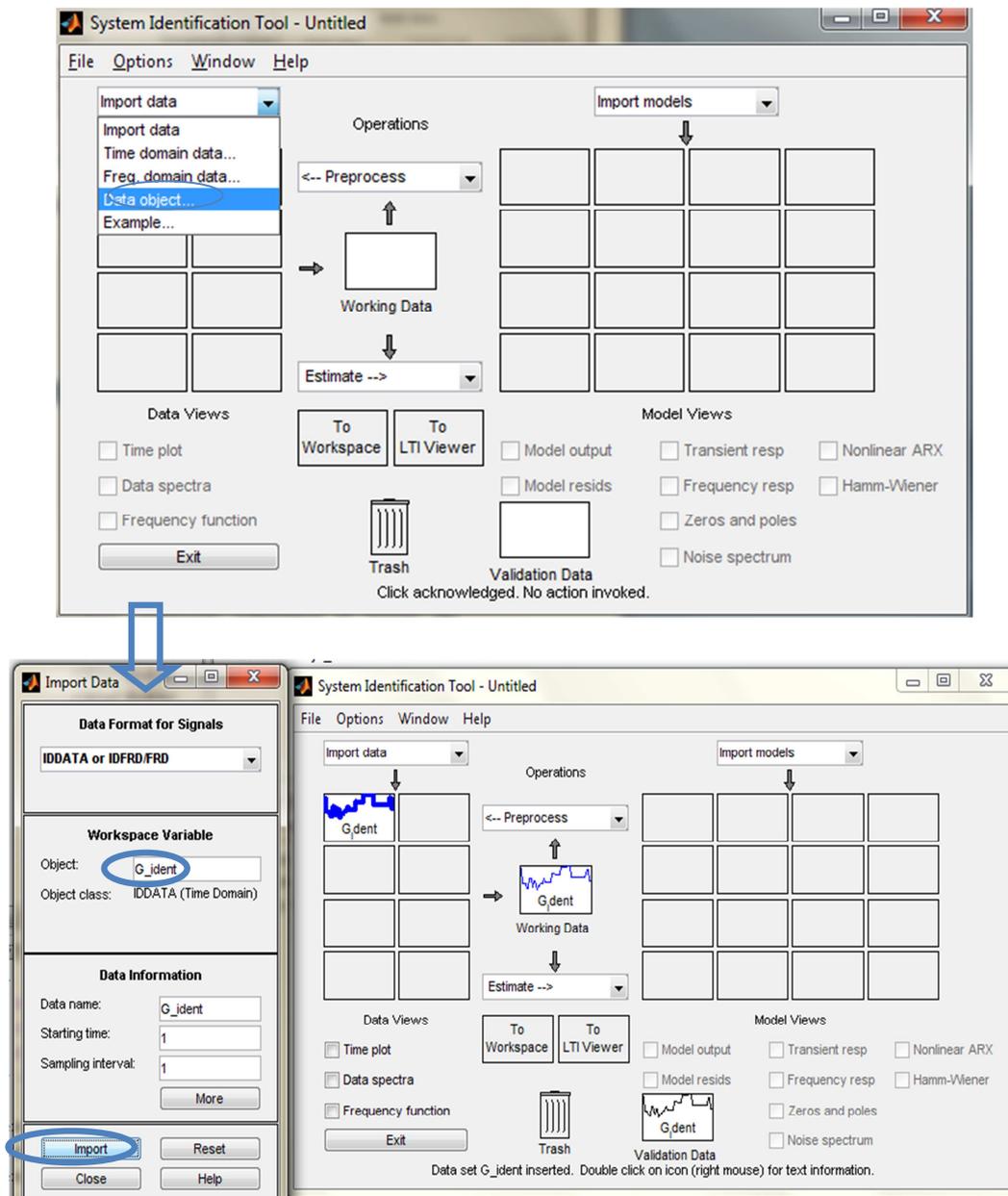


Figura 31. Importando los datos de entrada y salida en IDENT de Matlab

CAPÍTULO 4.

Una vez importados el objeto se puede graficar las señales con la selección de *Time Plot*. En el área de *Working Data* se observa que se encuentra el objeto importado para poder realizar la identificación, se selecciona el método de estimación, Linear parametric models, se selecciona el modelo (ARX), y el orden al cual se va a identificar el sistema, se selecciona *Estimate*, como se muestra en la Figura No. 32.

Se obtendrá el modelo el cual, se mostrará en la ventana principal de matlab, en donde se podrá seleccionar Model Output, para observar el seguimiento que la identificación da a la planta según los datos de entrada y salida, y verificar el modelo obtenido dando doble clic en el mismo, esto se puede observar en la Figura No. 33.

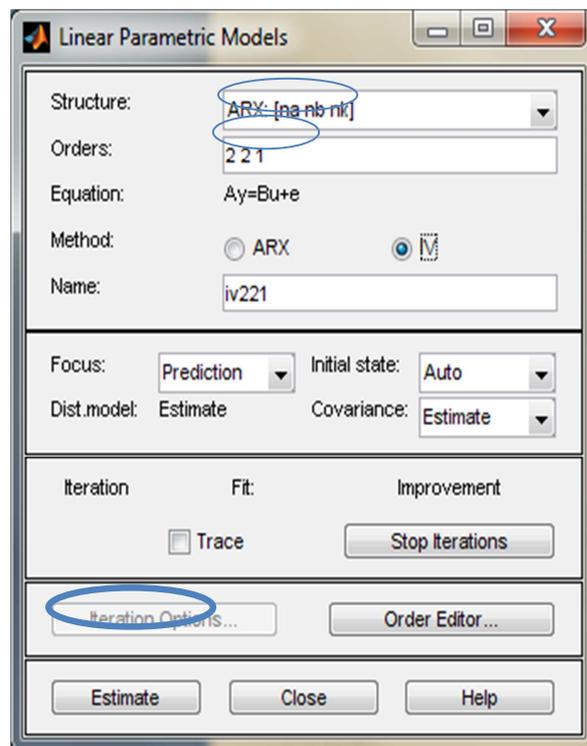
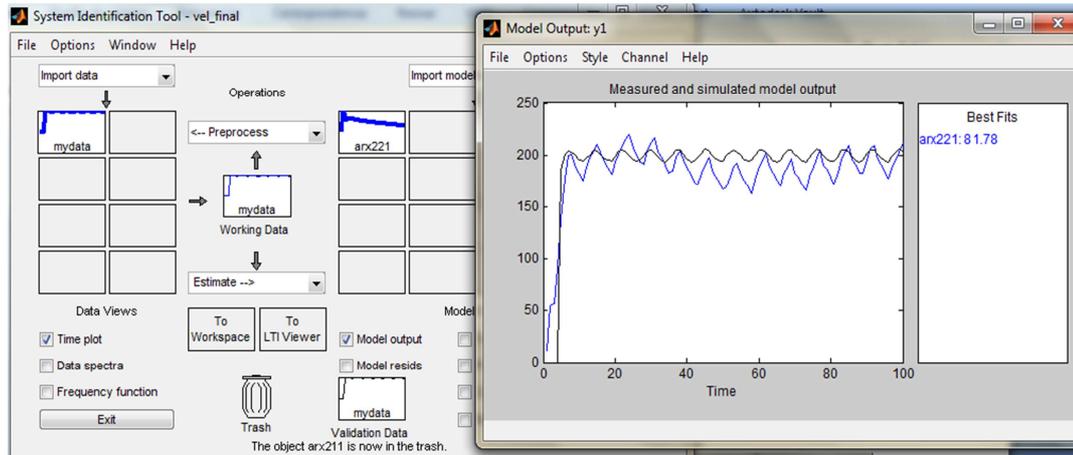
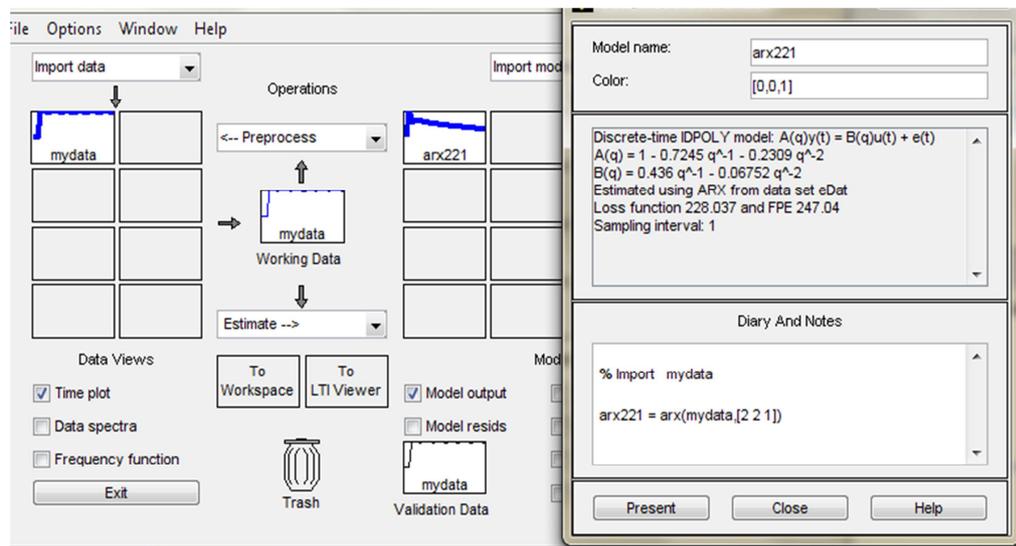


Figura 32. Linear Parametric Models, escogiendo el modelo y el orden de la planta

CAPÍTULO 4.



(a)



(b)

Figura 33. Modelo de la Planta (a) Gráfica de salida del modelo de identificación (b) Parámetros obtenidos del modelo de identificación

Finalmente se interpreta los datos obtenidos, reemplazándolos en la ecuación de transferencia de segundo orden de la cual queríamos hallar sus parámetros, de la Ec. 14, los parámetros a identificar son:

El modelo obtenido de Matlab es el que se puede observar en la figura No. 34.

Donde;

B: son los parámetros del numerador

A: son los parámetros del denominador

```
>> arx221
Discrete-time IDPOLY model: A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)
A(q) = 1 - 0.7245 q^-1 - 0.2309 q^-2

B(q) = 0.436 q^-1 - 0.06752 q^-2

Estimated using ARX from data set eDat
Loss function 228.037 and FPE 247.04
Sampling interval: 1

>> |
```

Figura 34. Modelo obtenido con la herramienta IDENT, modelo ARX

Por tanto la ecuación de transferencia de la planta identificada para el sistema de control de velocidad:

$$\frac{B(q)}{A(q)}$$

Donde Ec.40/A es la ecuación de la identificación del sistema que representa la velocidad y la Ec.40/B es la ecuación de la identificación que representa la potencia activa.

CAPÍTULO 4.

Se realiza el mismo procedimiento para la identificación del sistema de excitación para el sistema de control de voltaje. Por tanto la ecuación de transferencia de la planta identificada para el sistema de control de voltaje:

$$G_V(z^{-1}) = \frac{y(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{1.86z^{-1}}{-0.01867z^{-2} - 0.748z^{-1} + 1} \quad \text{Ec. 41/A}$$

$$G_Q(z^{-1}) = \frac{y(z^{-1})}{u(z^{-1})} = \frac{0.5151z^{-1}}{0.5237z^{-2} - 1.498z^{-1} + 1} \quad \text{Ec. 41/B}$$

Donde Ec.41/A es la ecuación de la identificación del sistema que representa el Voltaje y la Ec.41/B es la ecuación de la identificación que representa la potencia reactiva.

4.2.5 Validación del modelo

Es de gran importancia demostrar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido por el sistema, que en este caso es la unidad generadora

Uno de los métodos que se usa para validar el modelo identificado simular el modelo identificado y comparar esta señal de salida con la señal real de salida del sistema, para ello se toman los datos iniciales del sistema y se los grafica, e igualmente con el modelo simulado, de ésta manera se puede observar los resultados de la identificación en las Figuras No. 35., No. 36 y Figuras No. 37, No. 38., para el sistema de velocidad y el sistema de voltaje respectivamente.

CAPÍTULO 4.

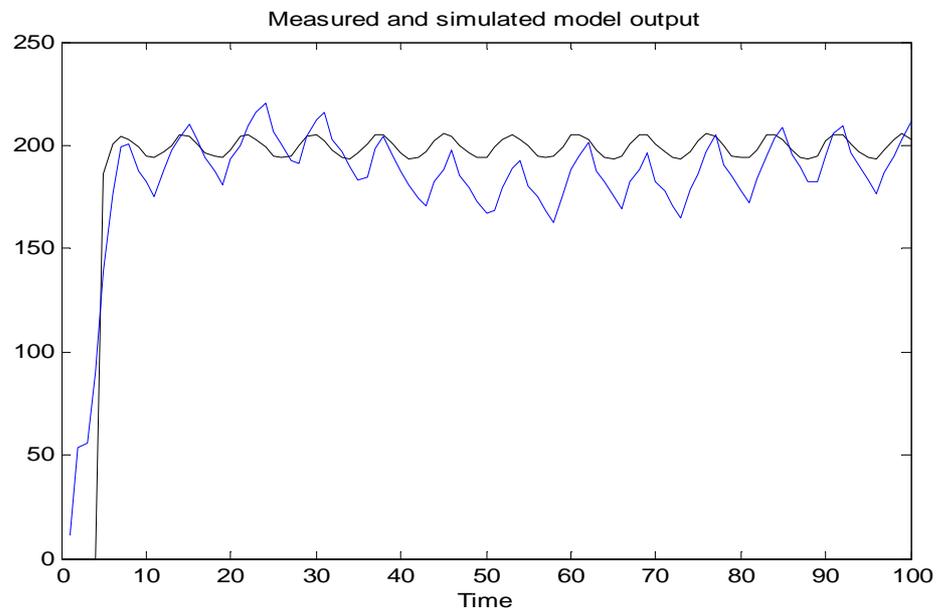
Gráfica de la señal real y simulada de salida del sistema de velocidad:

Figura 35. Gráfica de Velocidad, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de velocidad

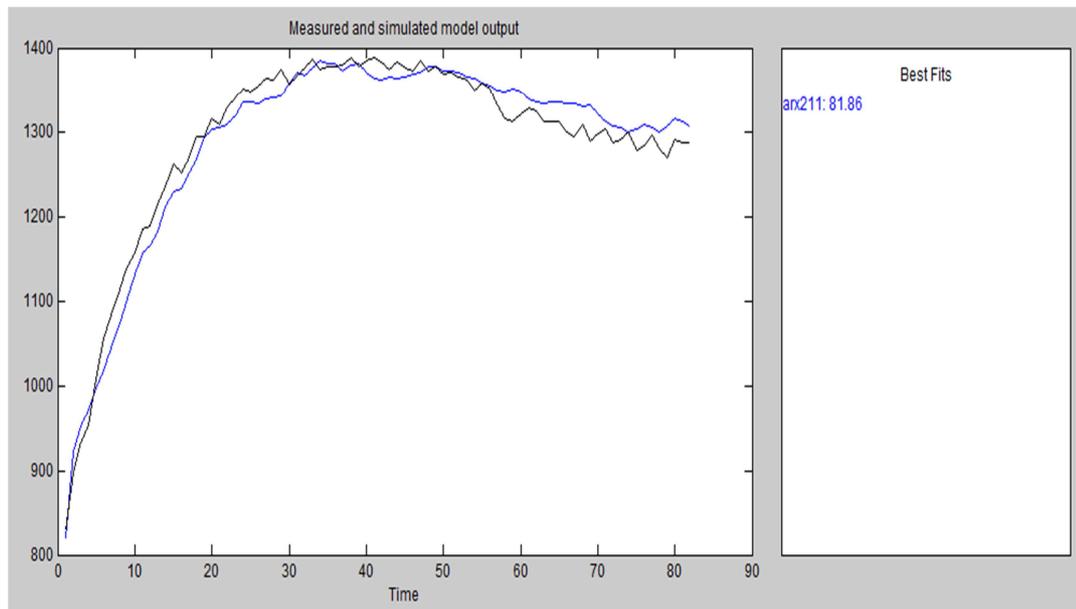


Figura 36. Gráfica de Potencia Activa, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de velocidad

Gráfica de la señal real y simulada de salida del sistema de voltaje:

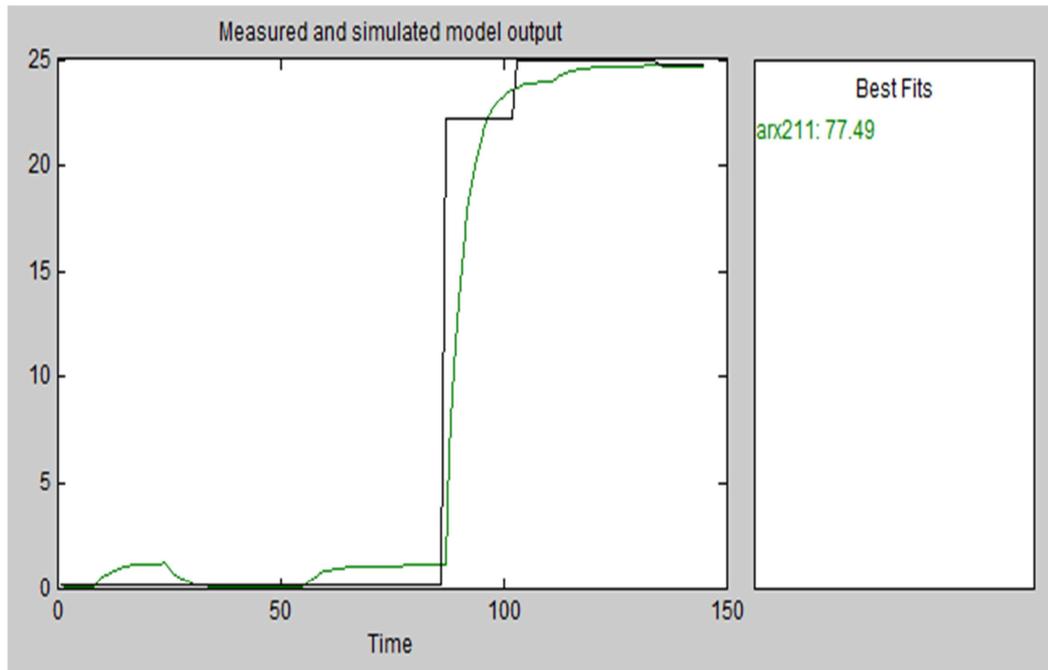


Figura 37. Gráfica de Voltaje, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de voltaje

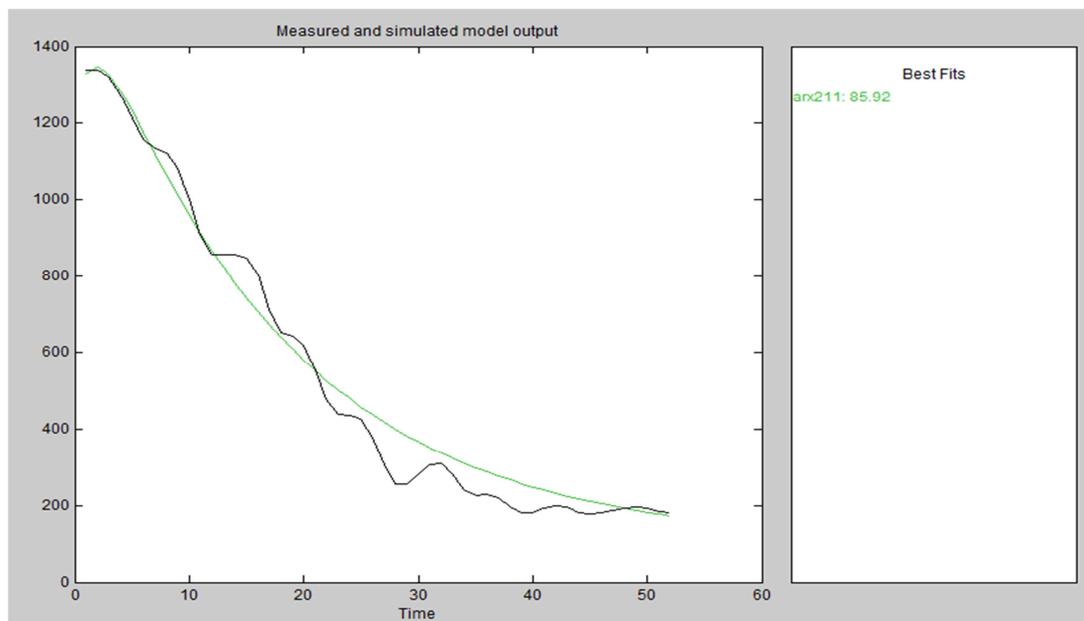


Figura 38. Gráfica de Potencia Reactiva, señal Simulada y Real de la planta de la UG4 para el sistema de voltaje

CAPÍTULO 4.

De esta manera se puede observar que el modelo identificado se aproxima notablemente al modelo de la aplicación, en el caso de la planta identificada para el sistema de control de velocidad la aproximación es de un 81.78% para velocidad y 88.86% para potencia activa, para el sistema de control de voltaje la aproximación es de 77.49% para el voltaje y 85.92% para la potencia reactiva.

Se analiza la gráfica de comparación de la planta que representa el voltaje de excitación ya que es la que menor aproximación presenta, si se observa la Figura No. 20. del capítulo anterior en la que se puede comprobar que existen variaciones de voltaje en la generación y también se observó el mismo comportamiento de variación en las mediciones de voltaje de excitación en el panel de control de la unidad 4 ubicado en la sala de control de la C.T. Guangopolo, cuyos datos medidos se los puede observar en la Tabla No. 13, de manera que, debido a estas oscilaciones y a que la respuesta de la rampa de excitación es inmediata, es decir tiene un cambio brusco de 0V a 20V, como se puede observar en la Figura No. 37. se considera aceptable el modelo de la planta de voltaje y de esta manera se llega a la conclusión que los modelos son aplicables para el diseño del controlador tanto de velocidad como de voltaje.

Tabla 13. Muestra de datos de Voltaje de Excitación tomados de la sala de control en el momento del arranque

Muestras n1 – n7	N8 – n14	N14 – n21	N22 – n28	N29 – n35	N36 – n42
0	20.001526	20.026407	20.0198503	19.9866168	20.0109581
0	20.012095	19.991796	20.0001497	20.0162874	20.027006
0	19.997874	20.030179	20.000149	20.016287	20.027006
0	20.008203	19.997814	20.020209	20.013143	20.030059
0	20.004221	20.039730	20.025089	20.028712	20.001377
0	20.011826	20.039730	19.988443	20.010509	20.004131
20.012934	20.0144012	20.015	20.0301796	19.9884431	20.0100299

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 4.

4.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para empezar con el diseño se debe considerar que el controlador es un dispositivo digital, para el cual se debe diseñar un control PID, para el control de velocidad y para el control de voltaje. Los controladores escogidos por requerimientos de la C.T Guangopolo son los que se detalla en la Tabla No. 14.

Tabla 14. Características del controlador de velocidad, Woodward

Marca:	Woodward	Basler Electric
Modelo:	2301D, Digital Load Sharing and Speed Control	DECS – 200, Digital excitation control system

Elaborado por: Autores del proyecto

Se requiere el diagrama del lazo cerrado para iniciar el diseño del controlador, que ayudará en el diseño del sistema de control de velocidad y voltaje, como el que se muestra en la Figura No. 39.

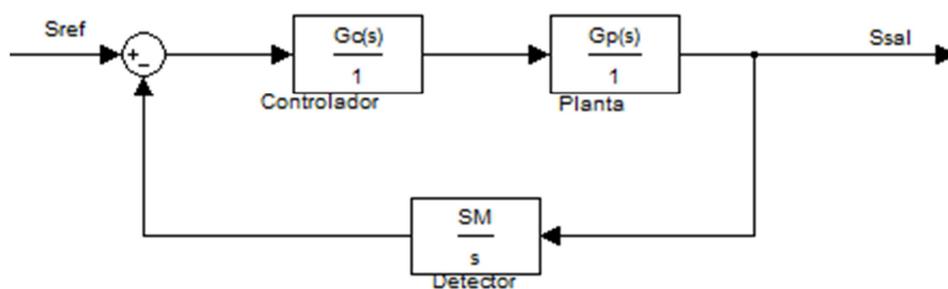


Figura 39. Diagrama del sistema de control de velocidad en lazo cerrado

Donde;

Gc: es el controlador PID

CAPÍTULO 4.

G_p : es la planta que representa a la máquina motriz o al excitador

SM: es el sensor de la señal de salida

S_{ref} : es la señal de referencia que representa la velocidad o el voltaje

S_{sal} : es la señal de salida que representa la velocidad o el voltaje

Como se puede observar en la Figura No. 39, el controlador está representado por $G_c(s)$, y la planta por $G_p(s)$ que ya se ha identificado en la sección anterior pero en tiempo discreto, es decir, en el dominio de Z. Para realizar la sintonización del PID se debe transformar las funciones de transferencia de velocidad y voltaje identificadas a tiempo continuo.

El controlador PID, consiste en una combinación de las tres acciones de control; proporcional, integral y derivativa, en la que la acción proporcional agrega una ganancia proporcional al error mejorando la estabilidad del proceso, la acción integral agrega una ganancia integral la cual disminuye el error a cero y la acción derivativa agrega una constante de tiempo derivativo que hace más rápida la acción de control, la unión de los tres tipos control forman el controlador PID, el cual une las ventajas de cada acción y elimina las desventajas que tiene cuando se aplican estas acciones solas. Entonces el controlador PID se define por;

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad Ec. 42$$

De donde se obtiene la siguiente función de transferencia;

$$G_c(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad Ec. 43$$

La Ec. 43. denota la función de transferencia del controlador PID en paralelo, para realizar la sintonización de los parámetros se utilizará la siguiente

CAPÍTULO 4.

función de transferencia estándar, y posteriormente se obtendrán los parámetros correspondientes;

$$G_C(s) = Kp\left(\frac{1 + T_i s + T_i T_d s^2}{s}\right) \quad \text{Ec. 44}$$

Una vez obtenida la función de transferencia del controlador se requiere un método para el ajuste de estos parámetros, para los dos casos se utilizará el método de sintonización de Ziegler – Nichols, segundo método de oscilación.

Este método se aplica cuando se tiene polos complejos conjugados, y consiste en;

- Añadir una constante proporcional K_c en el controlador del sistema de la Figura No. 39.
- Se eleva la ganancia, hasta que esta haga que el sistema sea críticamente estable para obtener la ganancia crítica K_{CR} .
- La ganancia crítica hace que el sistema oscile, por tanto se debe calcular el periodo de dicha oscilación, se lo conoce como periodo crítico T_{CR} ., sabiendo que $s = jw$, $w=2\pi f$ y $T=1/f$.
- Se reemplazan los valores de K_{CR} y T_{CR} para hallar K_p , K_i , y K_d , según la Tabla No. 15., de Ziegler Nichols.

Tabla 15. Parámetros de ajuste del método de oscilación por Ziegler - Nichols

	K_p	T_i	T_d
P	$0.50 K_{CR}$		
PI	$0.45 K_{CR}$	$0.833 T_{CR}$	
PID	$0.60 K_{CR}$	$0.50 T_{CR}$	$0.125 T_{CR}$

Fuente: (OGATA, 2003)
Elaborado por: Autores del proyecto

4.3.1 Diseño del Control de Velocidad

Como se mencionó anteriormente el modelo identificado debe estar representado por un sistema continuo, para ello se usa el software de matlab utilizando el comando *d2c*, primero se ingresa la función de transferencia discreta en la ventana de comandos de matlab, con un periodo de muestreo de 1 segundo, tal como se detalla en la Figura No. 40.

```
>> gz=tf([0.436 -0.06752],[1 -0.7245 -0.2309],1)

Transfer function:
    0.436 z - 0.06752
-----
z^2 - 0.7245 z - 0.2309

Sampling time: 1
```

Figura 40. Parámetros de ajuste del método de oscilación por Ziegler - Nichols

Seguidamente se usa el comando *d2c*, el cual convertirá al sistema continuo la función ingresada con el periodo de muestreo de 1 segundo, esto se lo puedo observar en la Figura No. 41.

```
>> gs=d2c(gz)

Transfer function:
    0.4633 s^2 + 2.232 s + 3.606
-----
s^3 + 2.895 s^2 + 12.02 s + 0.4365
```

Figura 41. Comando *d2c* para sistema continuo, regulador de velocidad

CAPÍTULO 4.

Entonces se obtiene la función de transferencia continua del modelo identificado;

Una vez obtenida el modelo identificado en el sistema continuo se debe obtener el K_{CR} o la ganancia crítica, de la manera que se muestra en la figura No. 42;

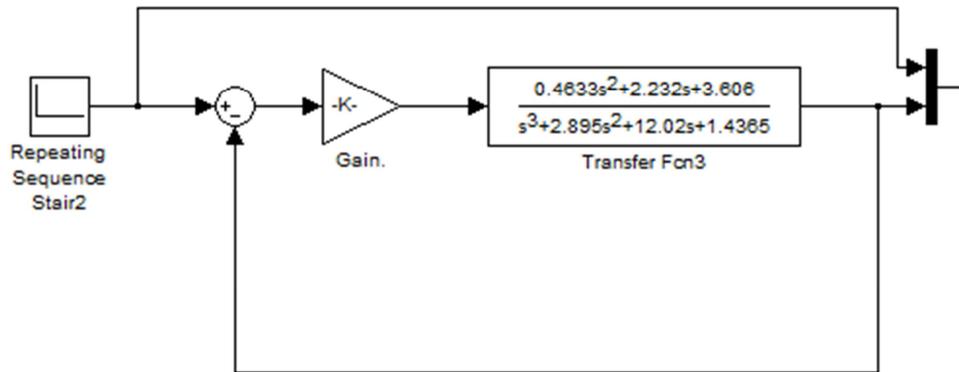


Figura 42. Controlador Proporcional para el sistema regulador de velocidad, para encontrar K_{cr}

Se necesita obtener la ecuación en lazo cerrado para obtener el polinomio característico, para ello la ecuación corresponde a;

Reemplazando los datos en la Ec. 46. Se obtiene el polinomio característico;

CAPÍTULO 4.

$$\Delta(s) = s^3 + 2.895s^2 + 12.02s + 0.4365 + kc \quad Ec. 47$$

Desarrollando el sistema;

$$\begin{array}{r} S^3 \quad 1 \qquad \qquad \qquad 12.02 \\ S^2 \quad 2.895 \qquad \qquad \qquad 0,4365 + Kc \\ S^1 \quad \frac{34.7979 - 0,4365 - Kc}{2.895} \\ S^0 \quad 0,4365 + Kc \end{array}$$

Para obtener el K_{CR} ;

$$\frac{34.3614 - Kc}{2.895} > 0 \quad Ec. 48$$

$$k_{CR} = 34.3614 \quad Ec. 49$$

Ahora se debe obtener el periodo crítico, para ello se reemplaza s por jw y el K_{CR} en el polinomio característico;

$$(jw)^3 + 2.895(jw)^2 + 12.02jw + 34.7979 \quad Ec. 50$$

Las raíces se obtiene ayudándonos del comando de matlab `>>roots`, escribiendo en la ventana de comandos de la siguiente manera; `>>roots([1 2.423 11.37 27.55])`, de donde se obtiene;

$$w = 0 + j3.4670 \quad Ec. 51$$

$$w = 0 - j3.4670 \quad Ec. 52$$

$$w = -2.895 \quad Ec. 53$$

Se escoge la raíz positiva imaginaria, y como sabemos que, $T=2\pi/w$;

Por último se debe reemplazar estos valores para obtener los parámetros de la Tabla No. 15.

De esta manera se obtiene el controlador PID, que se representa en el diagrama de la Figura No. 43. de simulink para la planta de velocidad y en la Figura No. 44 se puede observar el diagrama para la planta de potencia activa.

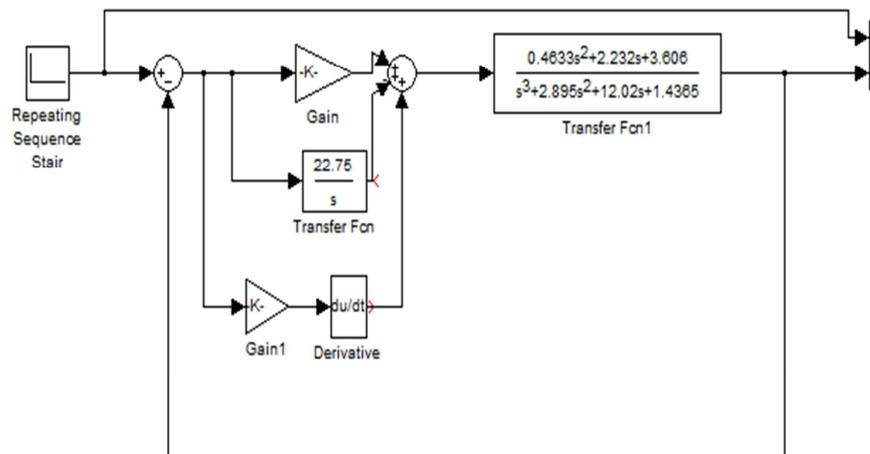


Figura 43. Control PID del sistema de velocidad, para la planta de velocidad

Los parámetros obtenidos del control PID para el sistema de control de velocidad son los que se observan en la Tabla. No. 16.

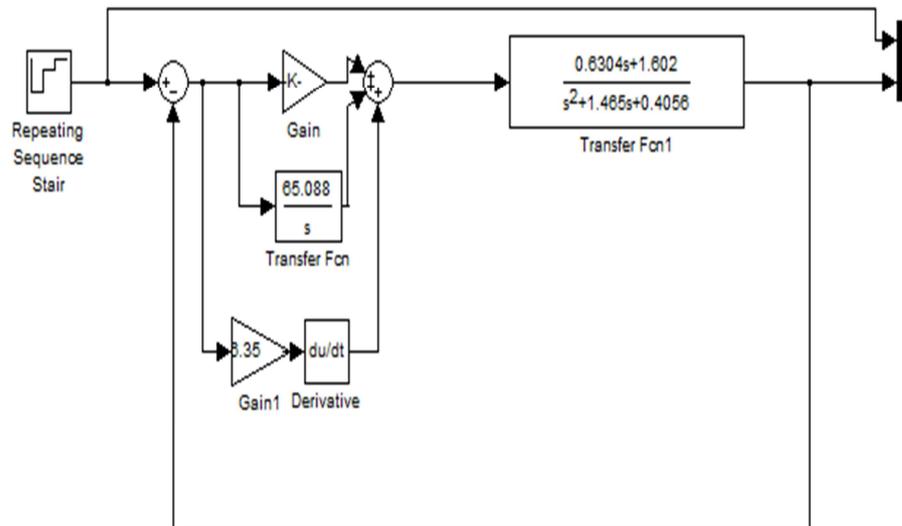


Figura 44. Control PID del sistema de velocidad, para la planta de potencia activa

Tabla 16. Parámetro del Control PID del sistema de Control de Velocidad

	VELOCIDAD	POTENCIA ACTIVA
Kp	20.6168	40.68
Ki [1/seg.]	22.7508	65.088
Ti [seg.]	0.9062	0.625
Kd [seg.]	4.6697	6,35
Td [seg.]	0.2265	0.1563

Elaborado por: Autores del proyecto

4.3.2 Diseño del Control de Voltaje

De la misma manera que la sintonización del controlador anterior se debe empezar con la conversión de la planta identificada a sistema continuo, esto se puede observar en la Figura No. 45.

CAPÍTULO 4.

```
>> gz=tf([1.86 0],[1 -0.748 -0.01867],1)

Transfer function:
      1.86 z
-----
z^2 - 0.748 z - 0.01867

Sampling time: 1
```

Figura 45. Comando tf de matlab, función de transferencia discreta, regulador de voltaje

Seguidamente se usa el comando *d2c*, el cual convertirá al sistema continuo la función ingresada con el periodo de muestreo de 1 segundo, como se muestra en la Figura No. 46;



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> gs=d2c(gz)
Warning: The model order was increased to handle real negative poles.
> In warning at 26
   In ltipack.ssdata.utInvDiscretizeZOH at 76
   In ltipack.ssdata.d2c at 21
   In ltipack.tfdata.d2c at 37
   In lti.d2c at 60

Transfer function:
      2.252 s^2 + 16.6 s + 48.9
-----
s^3 + 7.703 s^2 + 25.65 s + 6.134
>>
```

Figura 46. Comando d2c para sistema continuo, regulador de voltaje

Entonces se obtiene la función de transferencia continua del modelo identificado;

CAPÍTULO 4.

Una vez obtenida el modelo identificado en el sistema continuo se debe obtener el K_{CR} , de la manera que se muestra en la Figura No. 47.

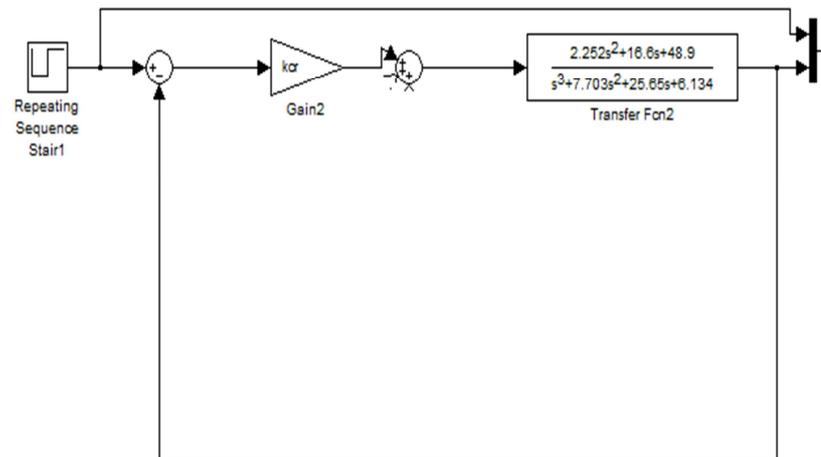


Figura 47. Controlador Proporcional para el sistema regulador de voltaje, para encontrar K_{cr}

La ecuación en lazo cerrado está dada por la Ec. 46., reemplazando datos y desarrollando la ecuación se obtiene el polinomio característico;

Desarrollando el sistema;

$$\begin{array}{r}
 S^3 \quad 1 \qquad \qquad \qquad 25.65 \\
 S^2 \quad 7.703 \qquad \qquad \qquad Kc \\
 S^1 \quad \underline{\hspace{10em}}
 \end{array}$$

CAPÍTULO 4.

$$S^0 \quad 6.134 + Kc$$

Para obtener el K_{CR} ;

$$\frac{191.448 - Kc}{7.703} > 0 \quad \text{Ec. 60}$$

$$k_{CR} = 191.448 \quad \text{Ec. 61}$$

Ahora se debe obtener el periodo crítico, para ello se reemplaza s por jw y el K_{CR} en el polinomio característico;

$$(jw)^3 + 7.703(jw)^2 + 25.65jw + 197.582 \quad \text{Ec. 62}$$

Las raíces se obtiene ayudándonos del comando de matlab `>>roots`, escribiendo en la ventana de comandos de la siguiente manera; `>>roots([1 7.703 25.65 197.582])`, de donde se obtiene;

$$w = 0 + j5.0646 \quad \text{Ec. 63}$$

$$w = 0 - j5.0646 \quad \text{Ec. 64}$$

$$w = -7.703 \quad \text{Ec. 65}$$

Se escoge la raíz positiva imaginaria, y como sabemos que, $T=2\pi/w$;

$$T_{CR} = \frac{2\pi}{5.0646} = 1.2406 \quad \text{Ec. 66}$$

Por último se debe reemplazar estos valores para obtener los parámetros de la Tabla No. 15;

$$k_p = 0.6 * k_{CR} = 114.8688 \quad \text{Ec. 67}$$

$$T_i = 0.5 * T_{CR} = 0.6203 \quad \text{Ec. 68}$$

$$T_d = 0.125 * T_{CR} = 0.1551 \quad \text{Ec. 69}$$

CAPÍTULO 4.

De esta manera se obtiene el controlador PID, que se representa en el diagrama de la Figura No. 48. de simulink para la planta de voltaje y en la Figura No. 49. se observa el diagrama de la planta de potencia reactiva.

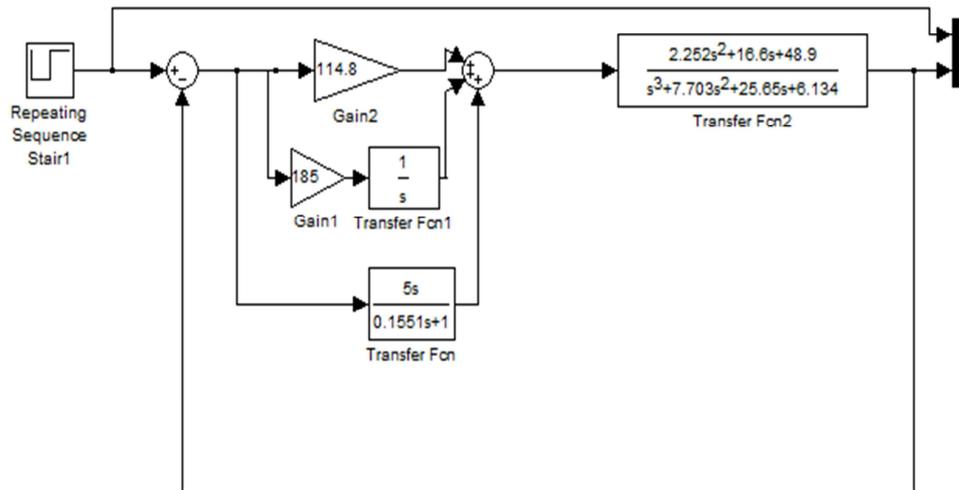


Figura 48. Diagrama de Control PID del sistema de voltaje, Voltaje

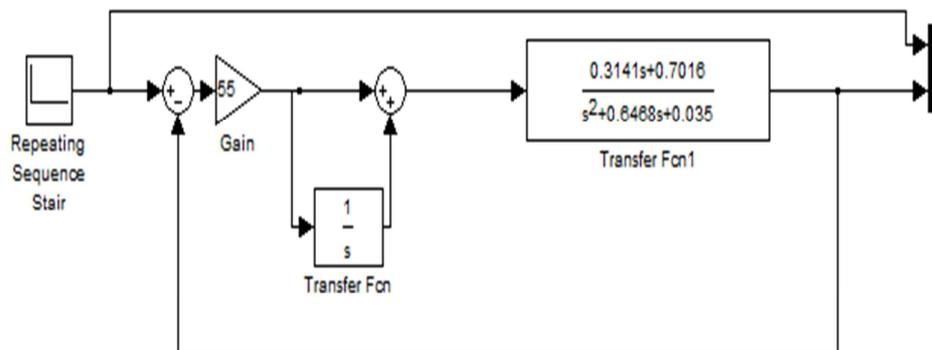


Figura 49. Diagrama de Control PID del sistema de voltaje, Potencia Reactiva

CAPÍTULO 4.

Los parámetros obtenidos del control PID para el sistema de control de voltaje son los que se observan en la Tabla. No. 17.

Tabla 17. Parámetro del Control PID del sistema de Control de Velocidad

	VOLTAJE	POTENCIA REACTIVA
Kp	114.8688	Kg = 54.96
Ki [1/seg.]	185.1827	-
Ti [seg.]	0.6203	1.0167
Kd [seg.]	17.8162	-
Td [seg.]	0.1551	-

Elaborado por: Autores del proyecto

En la Tabla No. 17. se observa la existencia de dos parámetros para el control de la potencia Reactiva esto es debido a que se basó en el modelo de control del dispositivo DECS-200 de la Figura 50. en el que se dispone de un control tipo PI para reactivos y en el que la ganancia Kp se encuentra representada por Kg.

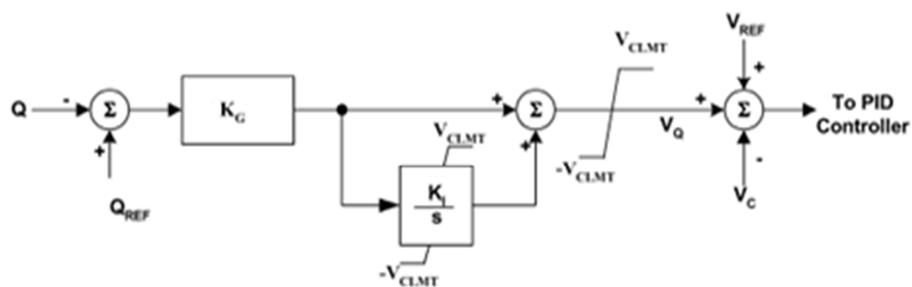


Figura 50. Modelo del Control de Potencia Reactiva del dispositivo DECS - 200, [Imagen de Propiedad (Basler Electric, 2011)]

CAPÍTULO 5.

SIMULACIÓN

5.1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN (GIJÓN, 2006)

El software de simulación tanto para el sistema de control de voltaje como para el de velocidad, es Simulink de Matlab.

Matlab es un lenguaje de alto nivel que contiene un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación, en el cual se puede analizar datos desarrollar algoritmos, y crear modelos y aplicaciones.

Simulink es una interfaz de Matlab, con un ambiente de diagramas de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. El entorno gráfico que proporciona al usuario facilita el diseño, análisis y simulación de sistemas tanto como de control, electrónicos, etc...

El programa Simulink incluye varias bibliotecas de varios componentes mecánicos, eléctricos, etc., para el diseño de sistemas lineales y no lineales, así como funciones matemáticas y conectores.

CAPÍTULO 5.

Para ingresar al programa, se ingresa a Matlab se presiona el botón *Simulink* o desde la ventana de comandos, escribiendo la palabra, `>>Simulink`, que inicializará la ventana de bibliotecas de simulink.

Los sistemas de control que se van a simular son los de velocidad y voltaje, los cuales ya se han analizado en capítulos anteriores, de ésta manera se sabe que a estos dos sistemas se los puede representar en dos lazos de control separados.

5.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

Como se ha mencionado el software de simulación que se ha utilizado es Simulink de Matlab, el mismo que ha sido de gran ayuda para conocer el comportamiento aproximado del sistema.

En el esquema básico de un sistema de control de velocidad se observa las variables *Pelec* y *Var*, que representan la potencia eléctrica y la velocidad respectivamente, la señal de salida es la potencia mecánica suministrada por el motor, y la realimentación es dada por la potencia o por la señal de salida del actuador, este diagrama general de sistemas modernos se lo representa en la Figura No. 51.

El esquema que se puede observar en la Figura No. 51. se puede simplificar para facilitar su análisis. En dicho esquema se encuentra el controlador eléctrico estándar, y el modelo de la planta que se encuentra dividido en el actuador y el motor, el modelo simplificado mostrará el actuador y el motor unidos en una sola planta y se utilizará un controlador PID en paralelo, como se puede observar en la Figura No. 52;

CAPÍTULO 5.

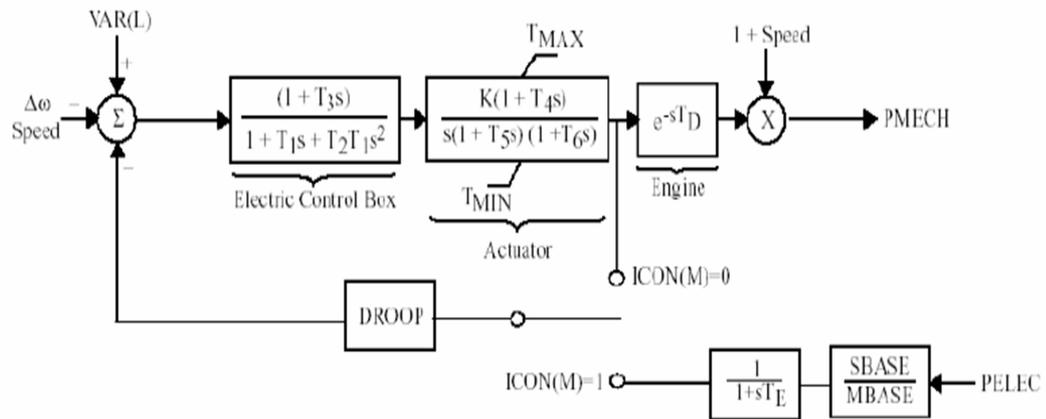


Figura 51. Esquema básico de un regulador de velocidad moderno, modelo DEGOV1, Woodward diesel governor, [Imagen de Propiedad (AGUERO J. L., 2009)]

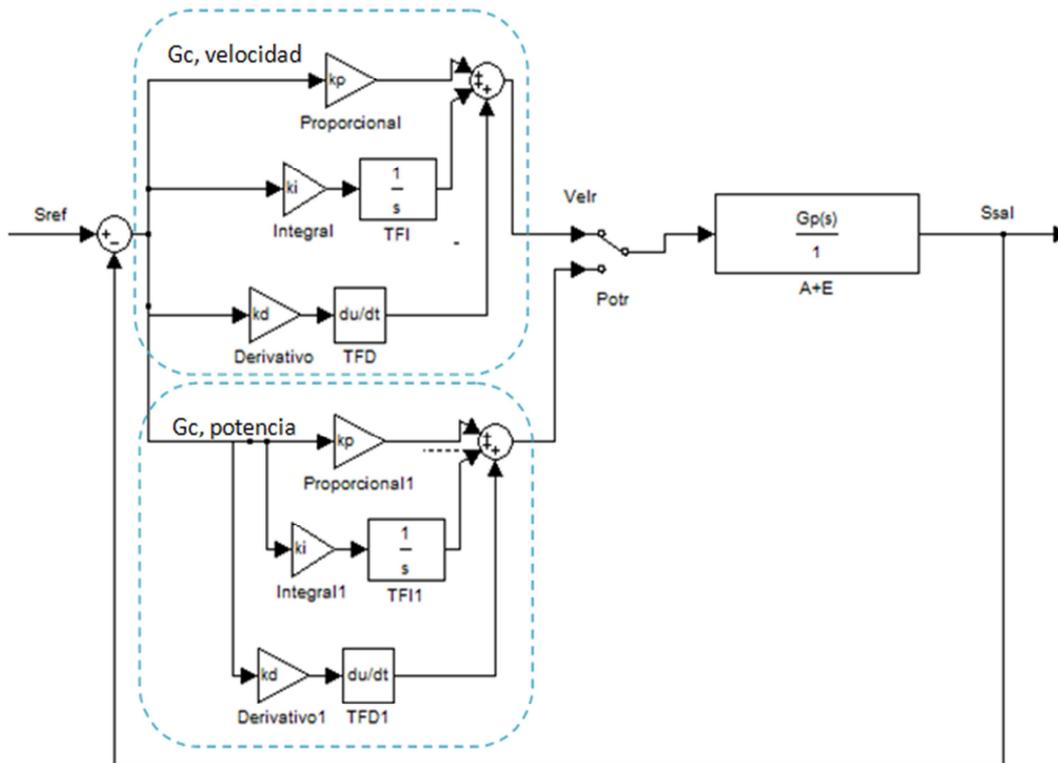


Figura 52. Diagrama simplificado del regulador de velocidad

Donde;

Gc: es el controlador PID utilizado en el regulador de velocidad para

CAPÍTULO 5.

velocidad y potencia

Kc: constante proporcional del controlador

Ki: constante integral del controlador

Kd: constante derivativa del controlador

Gp: es la planta que representa el actuador y el motor

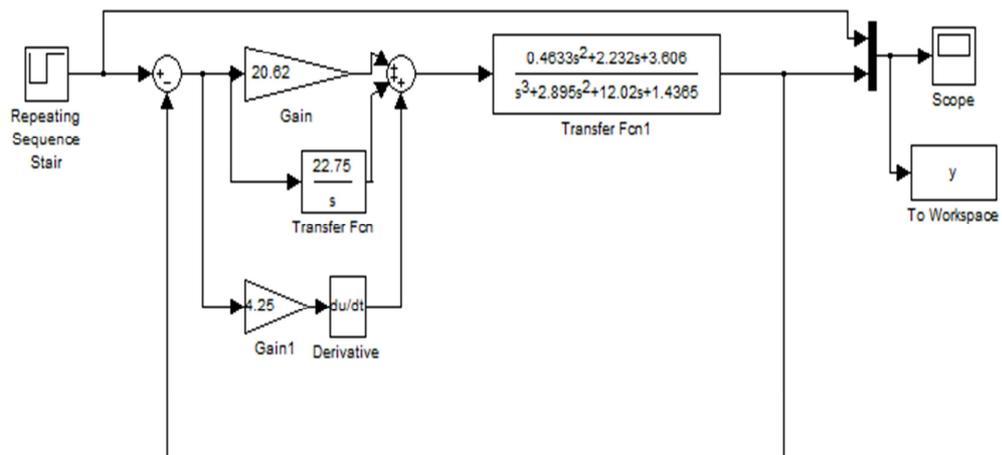
Sref: es la señal de referencia, es decir el valor al que se ajusta la velocidad o la potencia

Velr: es la señal de salida del regulador de velocidad en velocidad

Potr: es la señal de salida del regulador de velocidad en potencia

Ssal: es la señal de salida, es decir el valor de velocidad o potencia que suministra el sistema

Con el diagrama simplificado se puede reemplazar el modelo de la identificación que se obtuvo en el capítulo anterior, así como también los parámetros del controlador obtenidos de la sintonización, entonces se tiene el diagrama que se muestra en la Figura No. 53.



(a)

CAPÍTULO 5.

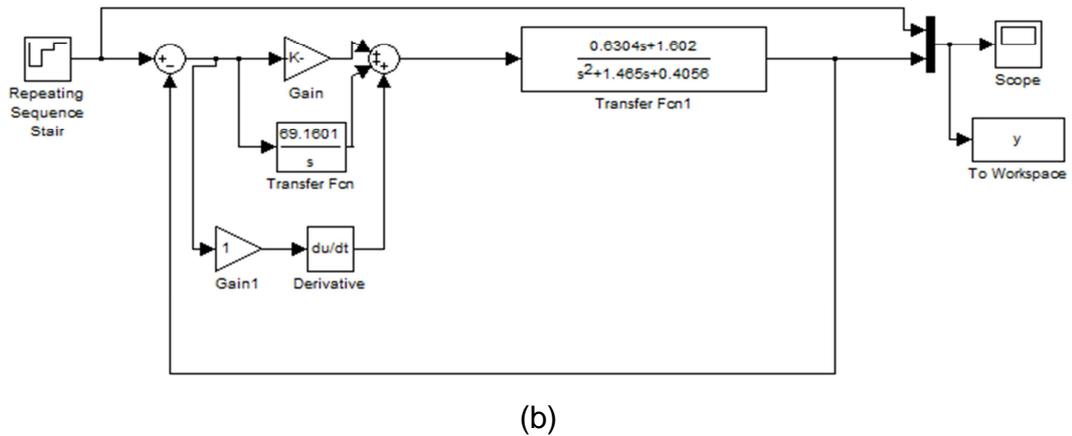


Figura 53. Regulador de velocidad, de la unidad 4 de generación en simulink (a) Velocidad (b) Potencia Activa

Los resultados de la simulación se observan en las siguientes gráficas, en el caso de la Figura No. 54, se toma como referencia una señal de referencia de entre 200 y 400 RPM valores con los que la unidad empieza la rampa de velocidad, en la Figura No. 55, se toma valores de referencia cuando existe un cambio de consigna de 3600 KW a 4550 KW y después a 5000KW.

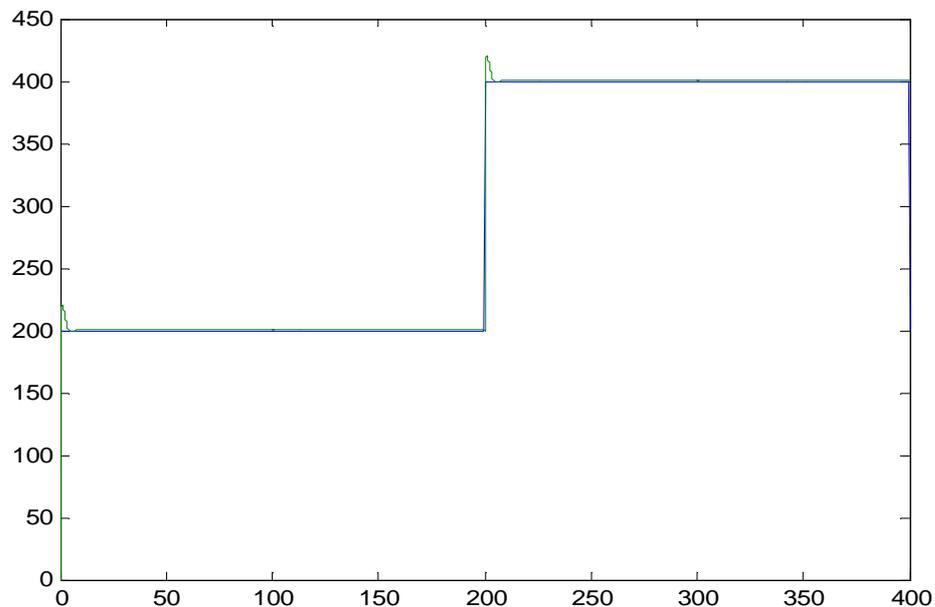


Figura 54. Resultado del control PID en el sistema de control de velocidad

CAPÍTULO 5.

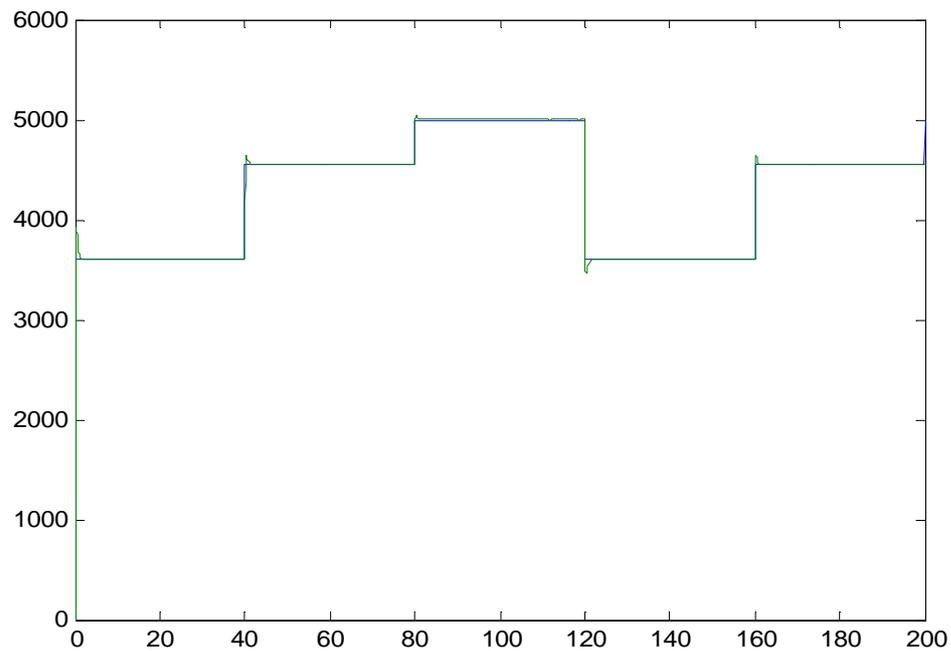


Figura 55. Resultados del Control PID aplicado para el control de Potencia Activa

Los parámetros PID utilizados en la simulación se detallan en la Tabla No. 18.

Tabla 18. Parámetros PID utilizados en la simulación

	VELOCIDAD	POTENCIA ACTIVA
Kp	20.62	40.68
Ki [1/seg.]	22.75	65.088
Kd [seg.]	4.25	3

Elaborado por: Autores del proyecto

5.3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE

El modelo matemático del sistema de excitación es el modelo tipo AC8B según "Prácticas recomendadas para modelos de sistemas de excitación para estudios de estabilidad, IEEE Std 421.5, 2005". En este modelo el AVR consiste

CAPÍTULO 5.

en el control por medio de un controlador PID, la representación del excitador sin escobillas viene dado por las variables T_E , K_E , S_E , K_C , K_D , el modelo AC8B es el que se muestra en la Figura No. 56.

Como se puede observar en la Figura No. 56. el modelo AC8B de la IEEE contiene elementos tales como; elementos de protección y limitación, y considera efectos de saturación y límites del excitador, el modelo es complicado para los fines de simulación, es por ello que en base a este modelo se procede a simplificar los bloques del diagrama sin considerar los efectos antes mencionados en simulink, tal como se muestra en la Figura No. 57.

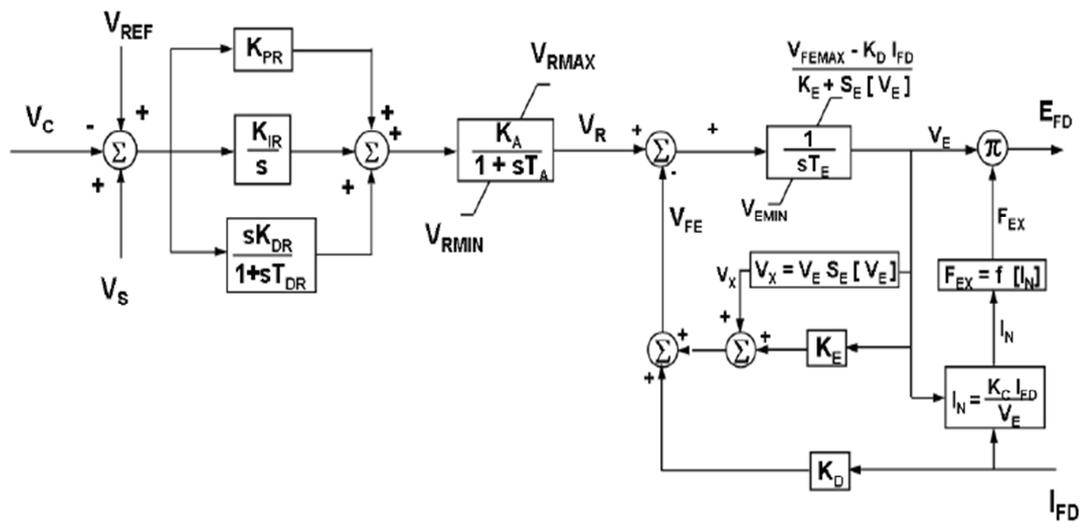


Figura 56. Diagrama del sistema de excitación con regulador de tensión, [Imagen de Propiedad, (IEEE 421.5, 2005)]

En la Figura No. 57. se observa el diagrama simplificado del modelo de la IEEE, en el que se puede aplicar la identificación del sistema y el diseño del controlador que se realizó en el capítulo 4, el diagrama del sistema de control de voltaje para la simulación en simulink se muestra en la Figura No. 58.

CAPÍTULO 5.

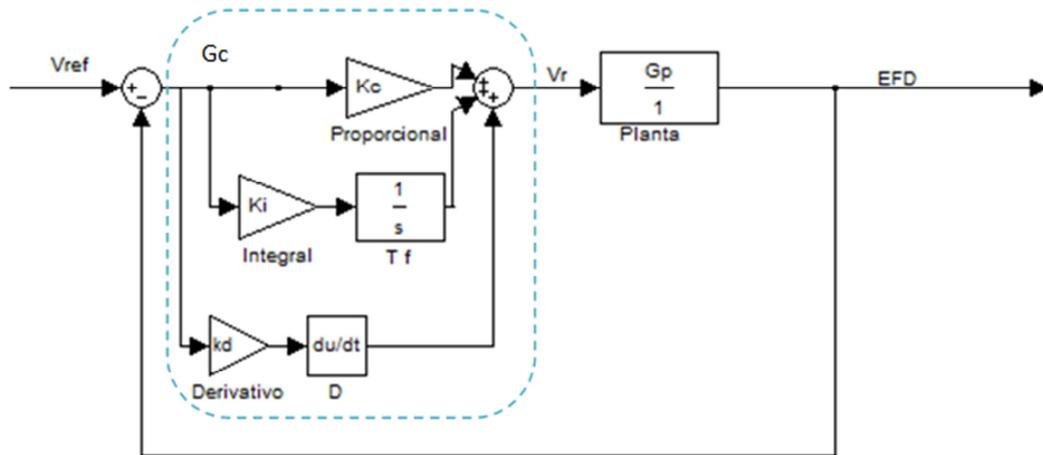


Figura 57. Diagrama simplificado del regulador de voltaje

Donde;

Gc: es el controlador PID utilizado en el regulador automático de voltaje, AVR

Kc: constante proporcional del controlador

Ki: constante integral del controlador

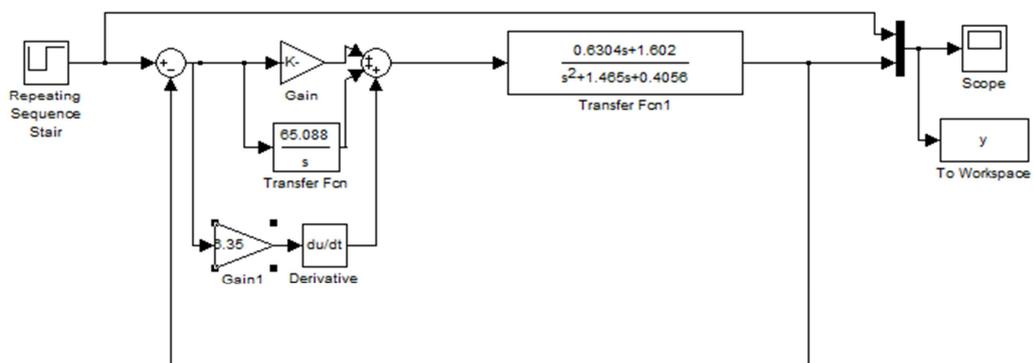
Kd: constante derivativa del controlador

Gp: es la planta que representa el excitador

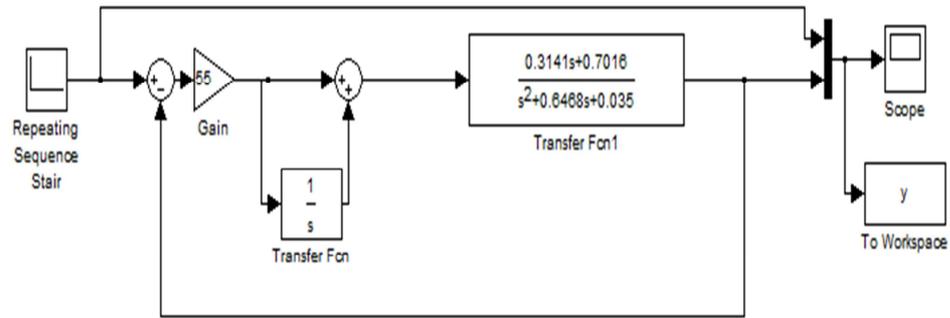
Vref: es el voltaje de referencia, es decir el valor al que se ajusta el voltaje

Vr: es la tensión de salida del AVR

E_{FD}: es el voltaje de salida del excitador



(a)



(b)

Figura 58. Regulador de Voltaje, de la unidad 4 de generación en simulink (a) Voltaje (b)Potencia Reactiva

Los resultados de la simulación se observan en las siguientes gráficas, en el caso de la Figura No. 59, se toma como referencia una señal de referencia de entre 20 y 40 V (voltaje de excitación) valores con los que la unidad empieza a generar, en la Figura No. 60, se toma valores de referencia de 2000 Var. y 2800 Var.

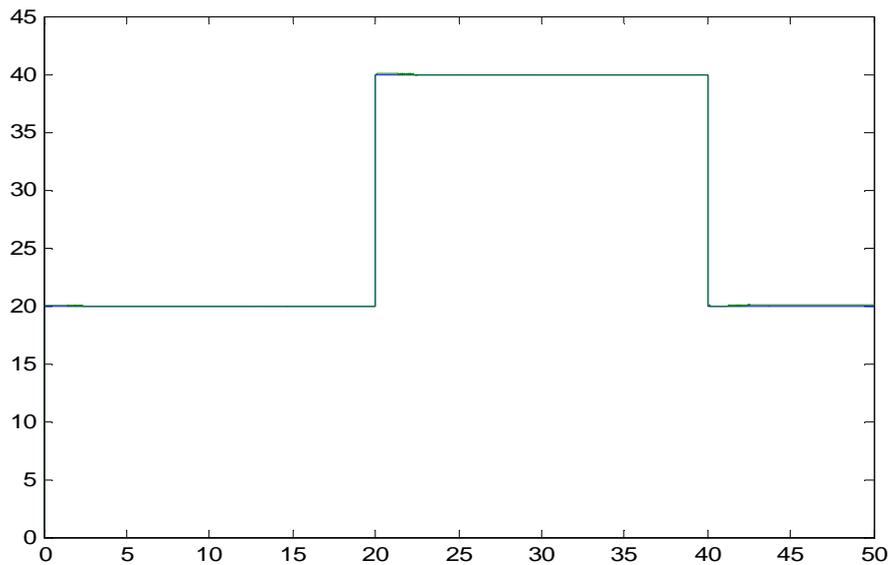


Figura 59. Resultado del control PID en el sistema de control de voltaje

CAPÍTULO 5.

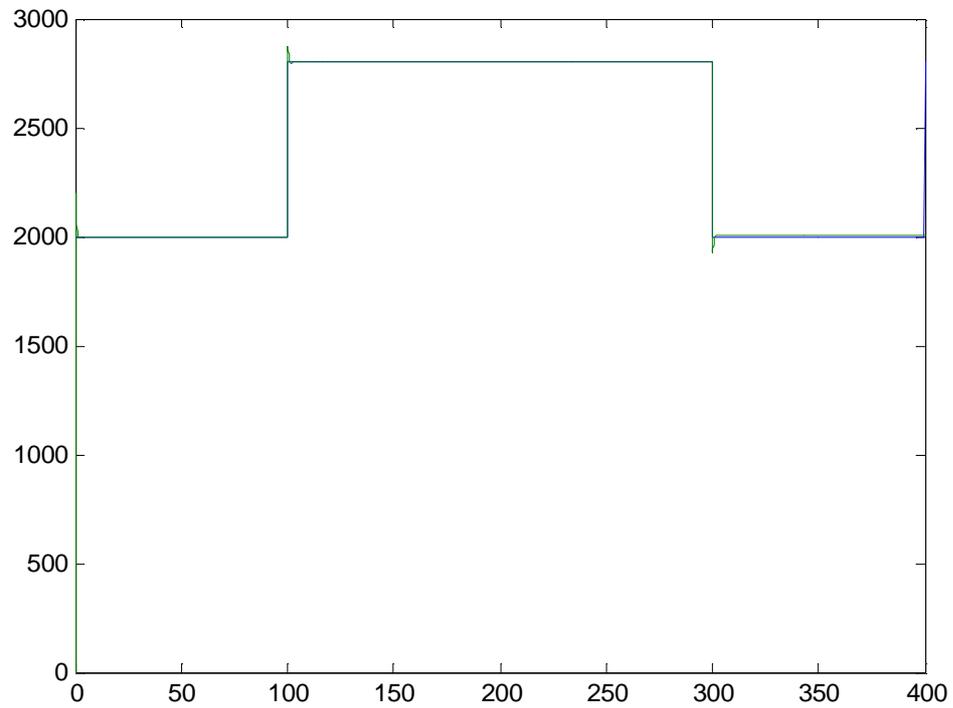


Figura 60. Resultados del Control PID aplicado para el control de Potencia Reactiva

Los parámetros PID utilizados en la simulación se detallan en la tabla No.

19.

Tabla 19. Parámetros PID utilizados en la simulación

	VOLTAJE	POTENCIA REACTIVA
Kp	114.8688	55
Ki [1/seg.]	185.1827	1
Td [seg.]	0.1551	-

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 5.

5.4 ANÁLISIS DE LOS TIEMPOS DE REPUESTA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y PROTECCIÓN ANTE UNA APERTURA SÚBITA DEL RELÉ DE DISTANCIA

Como parte del trabajo desarrollado y siendo uno de los objetivos para la implementación de los sistemas de control en la unidad de generación, mediante análisis se determinan los tiempos de respuesta de los controladores ante una apertura súbita del interruptor de distancia, a través de esta medida es posible regular los tiempos de disparo de los relés de protección y permitir que la unidad continúe suministrando energía eléctrica a los sistemas auxiliares.

En el esquema de la Figura No. 61. se ilustra resaltado en color azul el diagrama de conexión de los sistemas auxiliares y la unidad de generación al sistema interconectado.

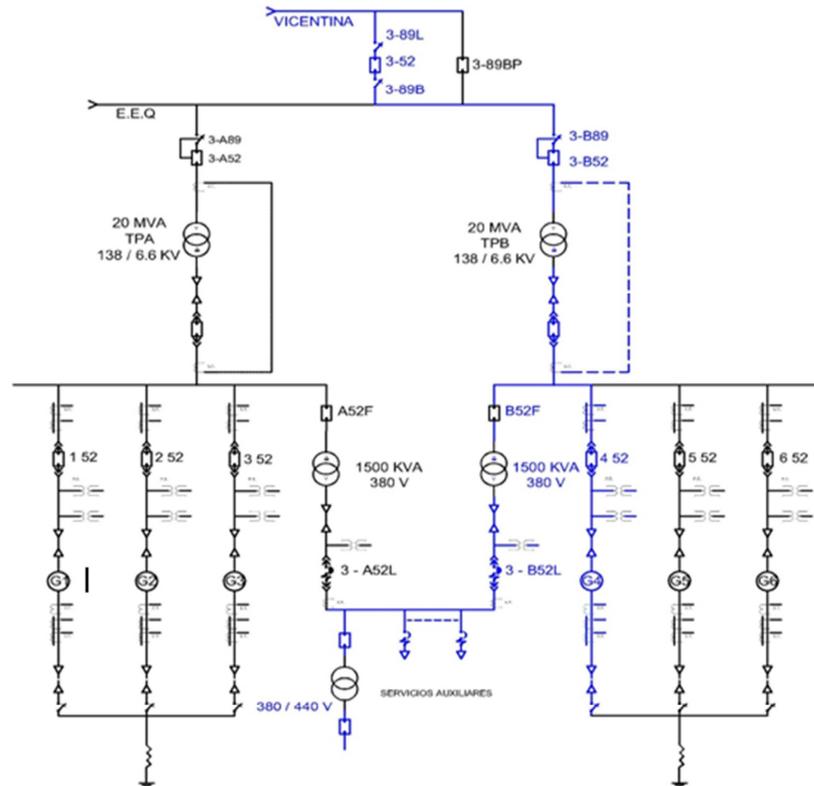


Figura 61. Esquema de conexión de las unidades de generación al sistema nacional interconectado.

CAPÍTULO 5.

La unidad 4 de generación se conecta a la barra B a través del interruptor 4 52, seguidamente mediante el transformador TBP de 138 / 6.6 KV, los interruptores y los seccionadores 3-B52, 3-B89, 3-89B, 3-52 y 3-89BL es conectado al sistema nacional interconectado.

De manera similar la energía suministrada a los sistemas auxiliares va desde las barras A y B, pasando por los interruptores B52F, A52F, el transformador de 6600 / 380 V y los interruptores 3-A52L y 3-B52L respectivamente de cada ramal.

Para permitir una operación en isla de la unidad ante una apertura súbita del relé de distancia 3-52, se considera definir los tiempos respuesta de cada uno de los relés de protección que condicionan la apertura de los interruptores, que van desde el generador hacia los sistemas auxiliares. Mediante una adecuada respuesta de los controladores de velocidad y voltaje, se espera que la unidad establezca condiciones estables de generación, es decir que se mantenga la frecuencia en 60 Hz y el voltaje en 6600 V.

Demanda de carga de los sistemas auxiliares

Para iniciar con este análisis se determinó la demanda de los sistemas auxiliares, mediante la información provista de las bombas y elementos de consumo de energía eléctrica, se obtuvo un valor aproximado a la potencia real de consumo. En la Tabla No. 20., se ilustra la demanda de energía eléctrica de los sistemas auxiliares distribuidos en cada una de sus áreas.

Con el valor de demanda de la carga aproximada se observa que es diferente de 0 Kw es por tal razón que existirá un flujo de potencia a la carga, el siguiente paso es determinar los tiempos de disparo de los dispositivos de

CAPÍTULO 5.

protección, en la Figura. No. 61. se ilustra cada uno de los interruptores a ser analizados.

Tabla 20. Demanda de los sistemas de auxiliares

			Descripción	Cantidad	Kw
CENTROS DE CONTROL UNITARIO No.1		CONTROL	Equipo de Rotación	1	1.5
			Bomba de suministro de combustible	1	2.2
			Bomba de aceite lubricante	2	44
			Bomba de aceite lubricante para mecanismo de distribución	1	0.4
			Bomba de aceite lubricante para purificador	1	3.7
			Purificador de aceite lubricante	1	3.7
			Bomba de agua válvula	1	2.2
			Bomba de agua de cilindro	1	30
			Soot blower	2	1.5
			Filtro de admisión	1	0.2
CENTROS DE CONTROL COMUN		CONTROL	Bomba de agua cruda	4	440
			Abanico para torre de enfriamiento	2	74
			Compresor de aire	2	44
			Sopladores de ventilación	5	37
			Sopladores de ventilación	2	22
			Bomba para boca de riego	1	7.5
			Bomba para extinguidores de espuma	1	30
			Bomba de agua cruda de reposición para torre de enfriamiento	2	15
			Bomba de agua desluce de reposición para caldera	1	3.7
			Bomba de agua de alzaralce	2	11
CENTROS DE CONTROL PARA SISTEMA DE ACEITE 380 V		CONTROL	Bomba de descarga de desagüe	2	0.8
			Bomba de desagüe de combustible	1	2.2
			Bomba de traslado de bunker "C"	2	14.8
			Purificadores de bunker "C"	4	44
			Bomba de traslado de cieno	1	1.5
			Bomba de traslado de diesel OIL	4	14.8
			Purificador de diesel OIL	2	22
			Bomba de traslado de aceite de cilindro	1	2.2
			Bomba de descarga para aceite de cilindro	1	3.7
			Bomba de traslado de aceite lubricante	2	7.4
Carga aproximada de los sistemas auxiliares:			Bomba de descarga de cieno	1	2.2
			Bomba de agua alimentador para caldera	2	15
			Bomba de agua dulce	1	2.2
					906.4

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 5.

Relés de protección (Meidensha, 1970)

Antes de empezar a describir las características de los relés de protección, la condición para que la unidad 4 de generación trabaje en isla se da a través de la condición de apertura del disyuntor 3-52 como se ilustra en la Figura. No. 62, este disyuntor permanece conectado durante un tiempo indefinido y solo ocurrirá una apertura si existiese una falla en el sistema nacional interconectado, es en ese instante donde los sistemas de control instalados deberán permitir a la unidad trabar en isla, regulando la frecuencia de la línea en 60 Hz con 400 rpm y un voltaje de 6600 V y de esta manera suministrar energía a los sistemas auxiliares.

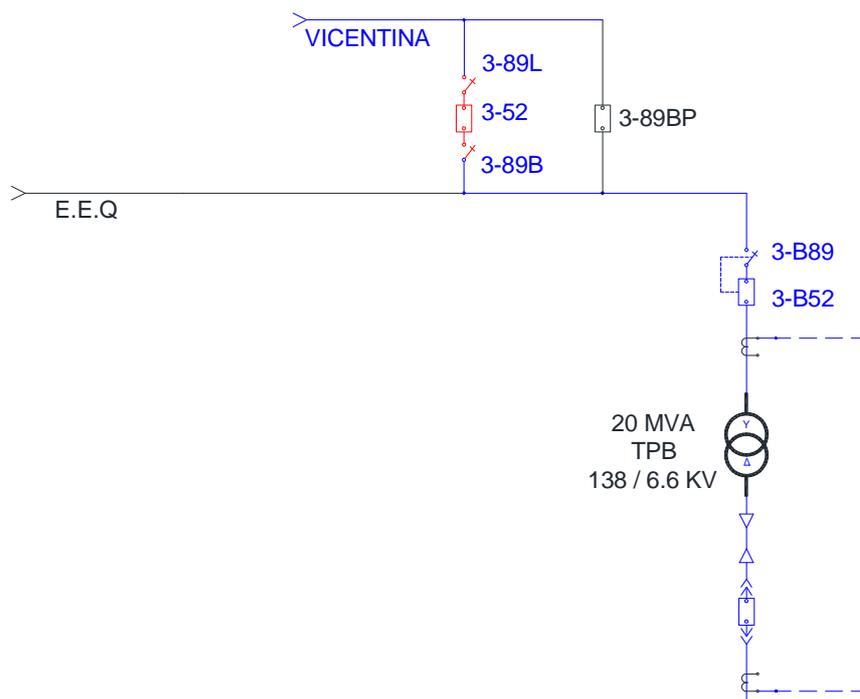


Figura 62. Diagrama unifilar del disyuntor de distancia, en condición de apertura.

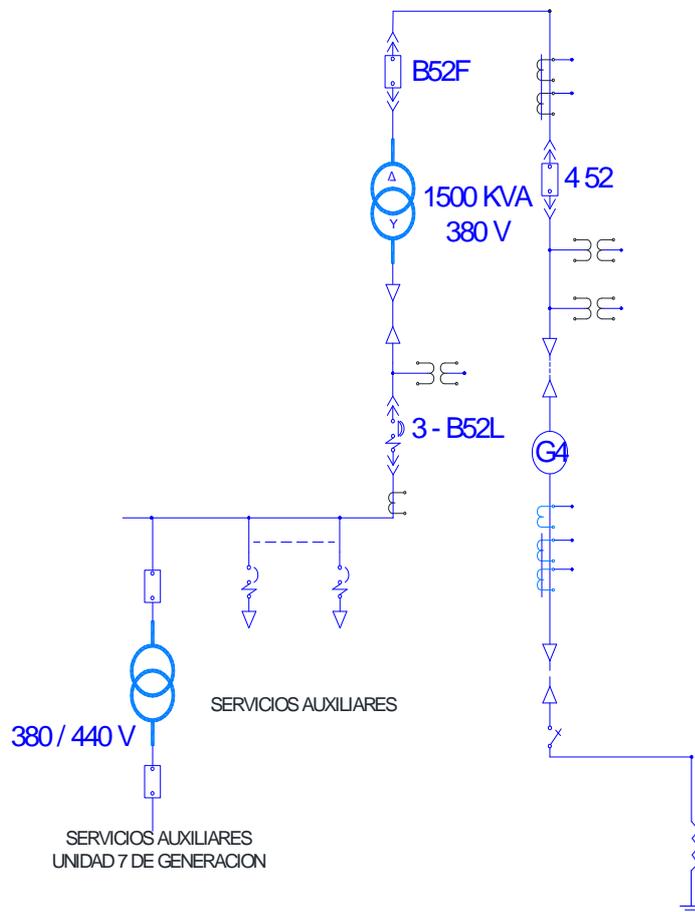


Figura 63. Diagrama unifilar de conexión de la unidad de generación a los sistemas auxiliares.

Interruptor 4 52

Para realizar el análisis de cada uno de los dispositivos de protección, se lo realizará desde el generador hacia los sistemas auxiliares indicados anteriormente, el primer elemento es el interruptor 4 52 como se ilustra en la Figura No. 63, la condición de apertura de este disyuntor está asociado a los relés de protección del sistema como se ilustra en el diagrama de la Figura No. 64.

CAPÍTULO 5.

Algunas de las protecciones son de tipo mecánicas es por esta razón que no se las tomará en consideración como parte de este estudio y tendrán prioridad las protecciones eléctricas.

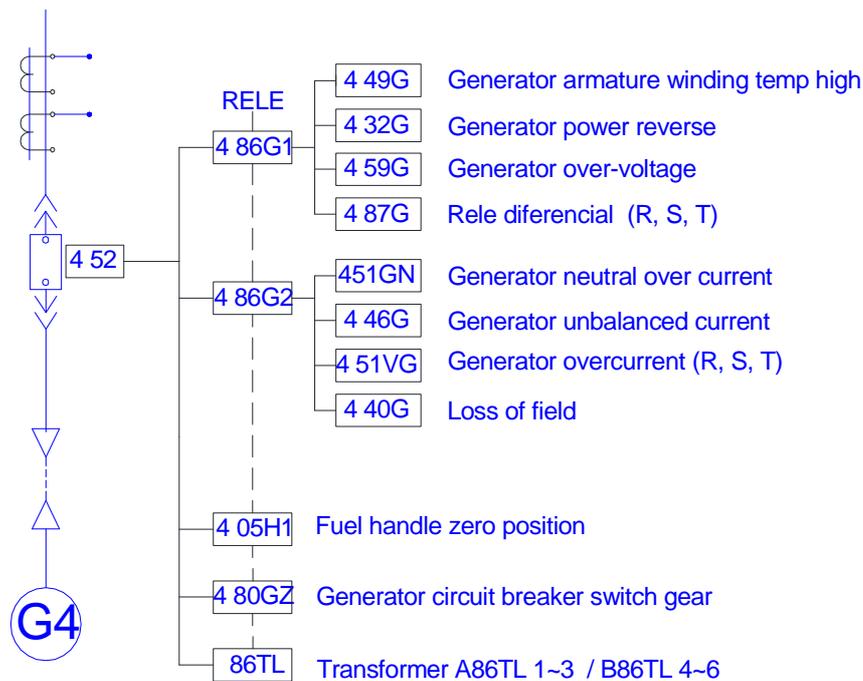


Figura 64. Condiciones de disparo del interruptor 4 52.

Los relés 4 86G1 y 4 82G2 agrupan las condiciones de los relés de protección, con cada una de las curvas de respuesta se analizará los tiempos de disparo de las protecciones, para establecer el tiempo de disparo se lo realiza a través de un TAP, este es un ajuste de tipo manual que se lo realiza a través de un tornillo en la parte frontal de cada relé.

En base al esquema anterior el primer relé de interés es el de potencia inversa 4 32G, y tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 65., cuyas características se observan en la Tabla No. 21.

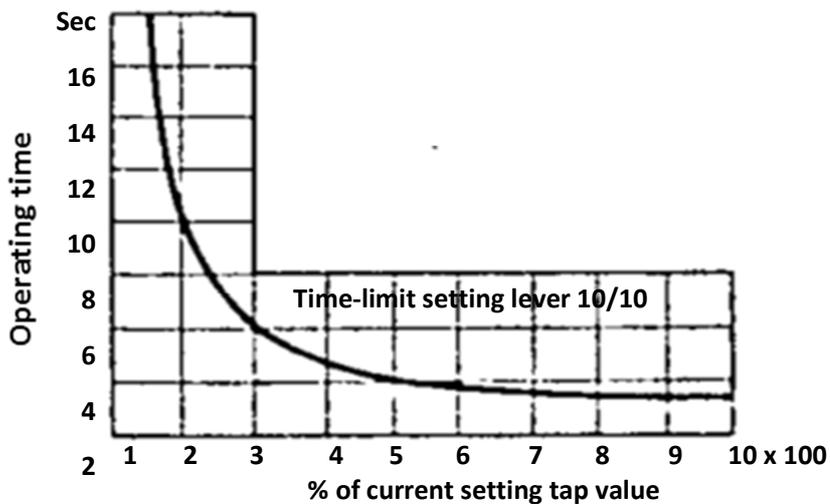


Figura 65. Características del tiempo de operación para el relé KIW4-KP, (Meidensha, 1970)

Tabla 21. Características del tiempo de operación para el relé KIW4-KP

TAP	Corriente [A]	Potencia [watts]	Tiempo Nominal [s]	Tiempo en pruebas [s]
6.1	0.54	-59.40	1.9	1.639

Fuente: (Central Termoelectrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

Seguidamente el relé de sobrevoltaje 4 59G tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 66., cuyas características se observan en la Tabla No. 22.

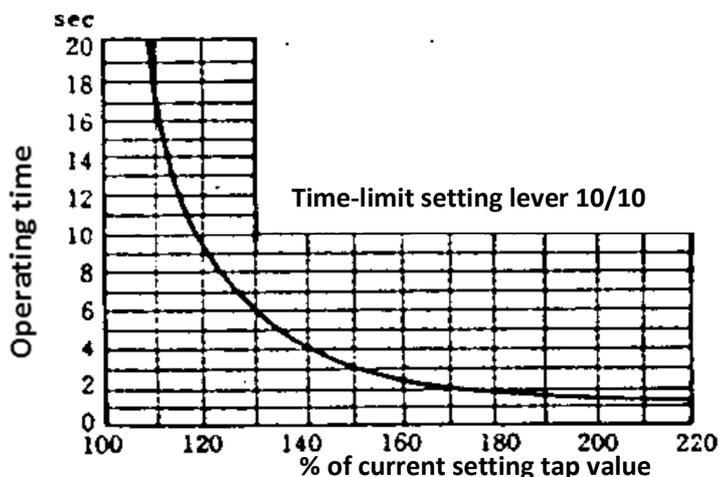


Figura 66. Características del tiempo de operación para el relé KIE-KP, (Meidensha, 1970).

CAPÍTULO 5.

Tabla 22. Características del tiempo de operación para el relé KIE-KP.

TAP	Sobrevoltaje [V]	Voltaje Nominal [V]	Tiempo Nominal [s]
130 V	130	110	6

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
Elaborado por: Autores del proyecto

El relé de sobrecorriente 4 51GN tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 67., cuyas características se observan en la Tabla No. 23.

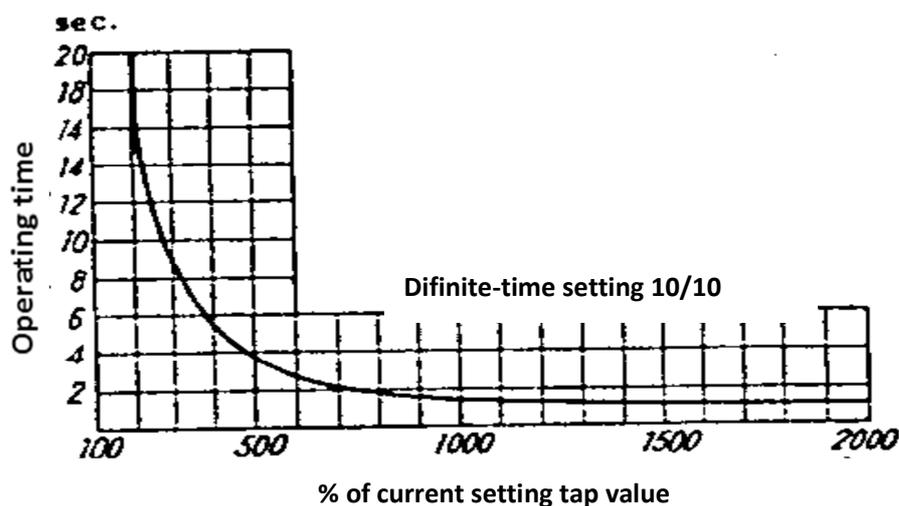


Figura 67. Características del tiempo de operación para el relé KI0-LGP, (Meidensha, 1970).

Tabla 23. Características del tiempo de operación para el relé KI0-LGP

TAP	Time Dial	Corriente [A]	Tiempo Nominal [s]
0.7 / 6	10	4.20	2.6

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 5.

El relé de desbalance de corriente 4 46GN tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 68., cuyas características se observan en la Tabla No. 24.

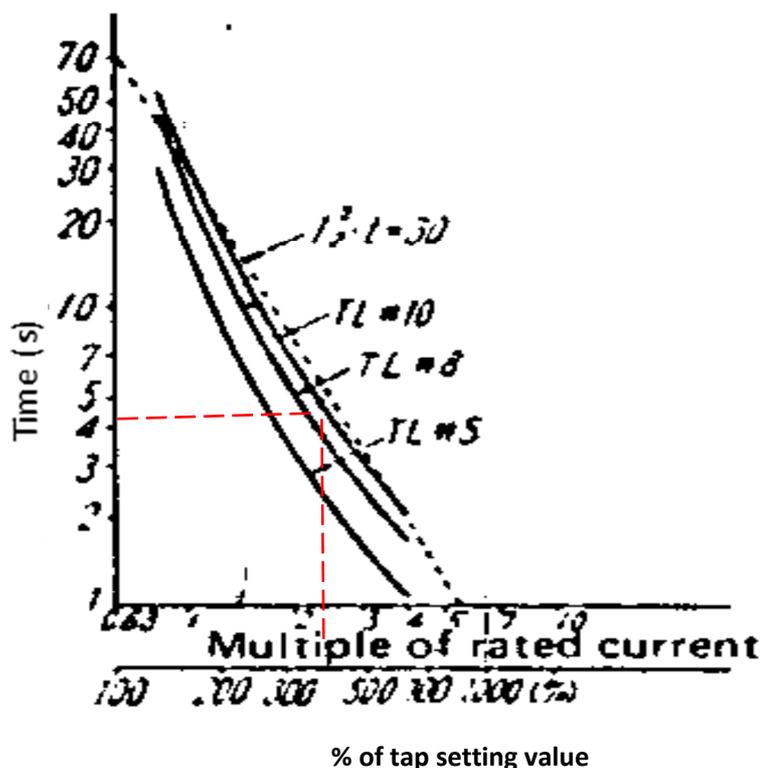


Figura 68. Características del tiempo de operación para el relé KIY₂ – C₅H, (Meidensha, 1970)

Tabla 24. Características del tiempo de operación para el relé KIY₂ – C₅H

TAP	Time Setting [s]	Corriente [A] CT	Tiempo Nominal [s]
2.5 A / 30 %	5	2.5	5

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
Elaborado por: Autores del proyecto

Además de los relés de protección descritos en el esquema del interruptor 4 52, están los relés diferenciales (R /S /T), el relé de sobrecorriente (R/ S/ T), y el relé por pérdida de campo.

CAPÍTULO 5.

El relé diferencial en (R/S/T) 87G tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 69., cuyas características se observan en la Tabla No. 25.

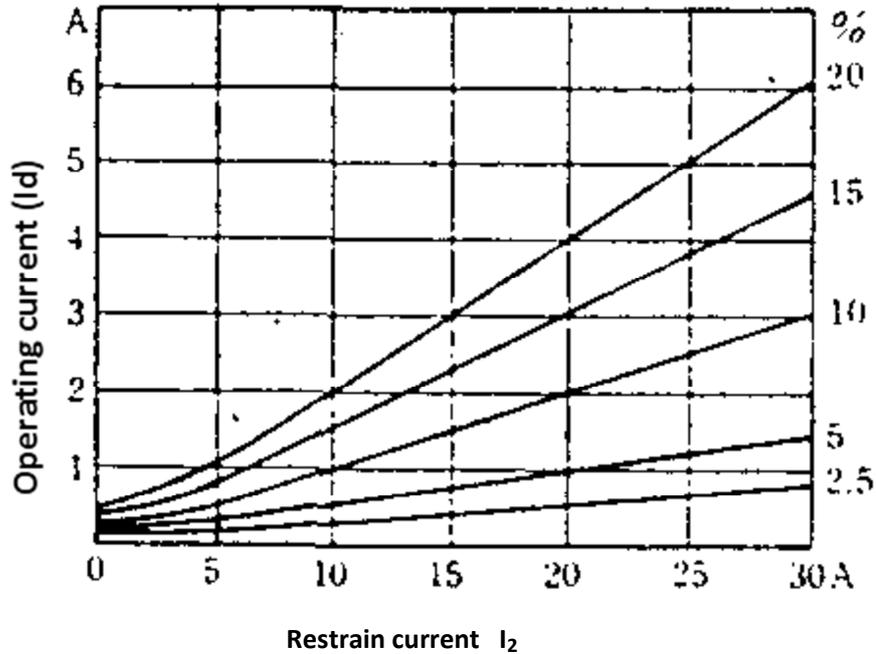


Figura 69. Característica porcentual del relé tipo KID-GRP, (Meidensha, 1970).

Tabla 25. Característica porcentual del relé tipo KID-GRP.

TAP	I_{Restrain}	Test_Slope R	Test_Slope S	Test_Slope T
5 %	5	4.5	4.5	4.5

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

El relé de sobrecorriente en (R/ S/ T) 51 VG tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 70., cuyas características se observan en la Tabla No. 26.

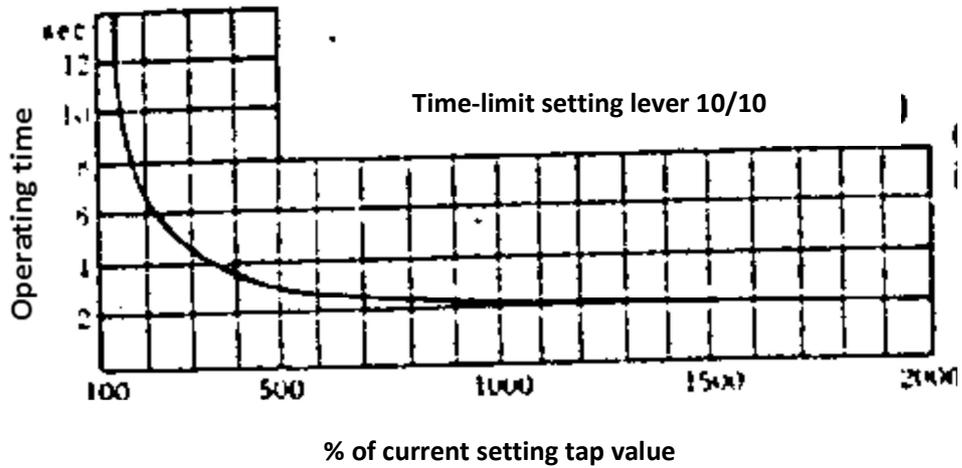


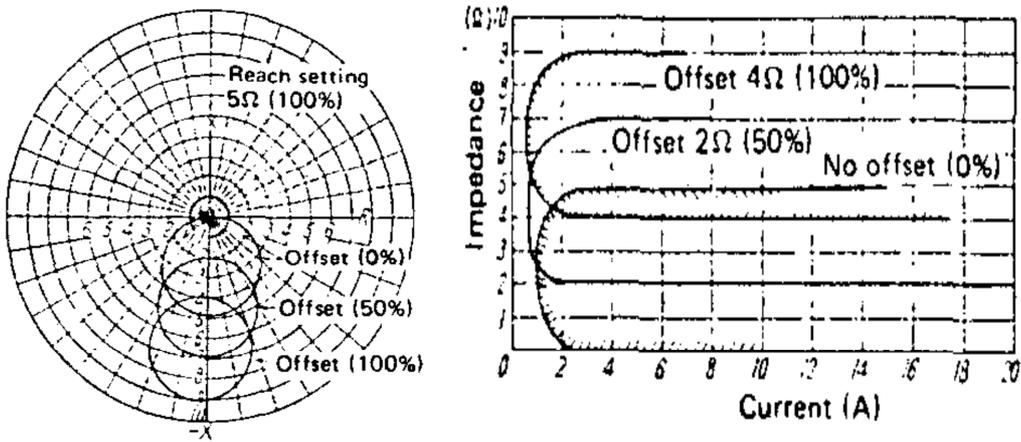
Figura 70. Curva de operación del relé 51VG, (Meidensha, 1970).

Tabla 26. Curva de operación del relé 51VG.

Restrain	TAP	Test_Time R [s]	Test_Time S [s]	Test_Time T [s]
2	4	2.236	2.323	2.215

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

El relé de pérdida de campo 40 G tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 71., cuyas características se observan en la Tabla No. 27.



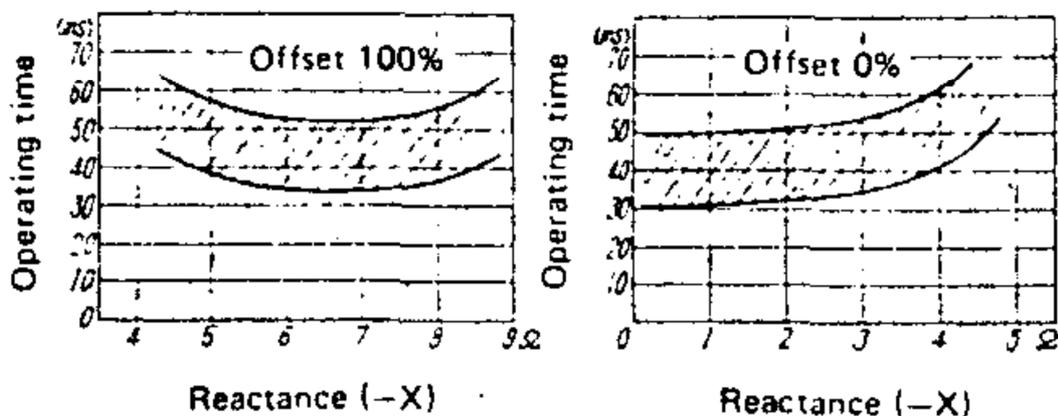


Figura 71. Características R-X, Impedancia y corriente, y el tiempo de operación según la reactancia, (Meidensha, 1970).

Tabla 27. Características R-X, Impedancia y corriente, y el tiempo de operación según la reactancia

Offset setting	Reach setting
0-80 %	0-30 %

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

Interruptor B-52F y B-52L

Continuando con la descripción de los tiempos de operación, el interruptor B-52F es llevado a la condición de apertura bajo las condiciones que se ilustra en el esquema de la Figura No. 72.

Los relés de protección de estos interruptores al igual que el interruptor 4 52 tienen sus propias curvas de operación. El primero es el relé de sobrecorriente 4 51F.

CAPÍTULO 5.

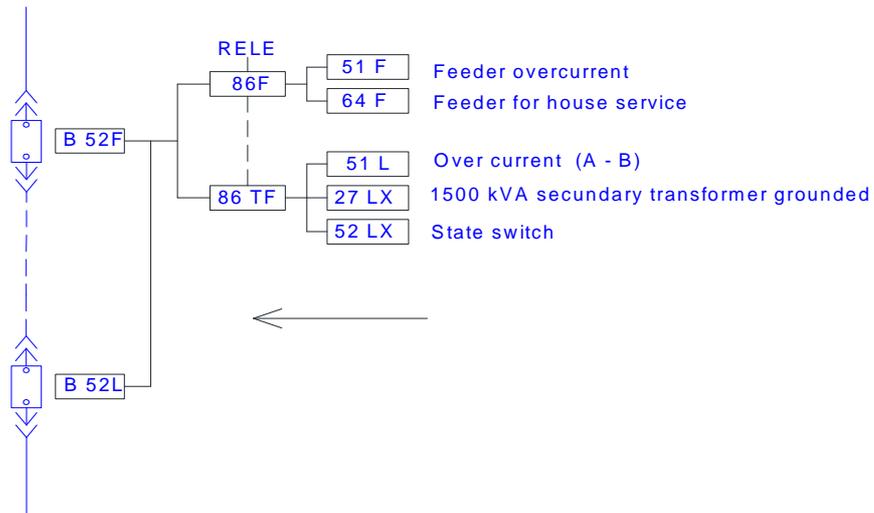


Figura 72. Esquema de condiciones para la apertura de los interruptores B52F y B52L.

Los relés de protección de estos interruptores al igual que el interruptor 4 52 tienen sus propias curvas de operación. El primero es el relé de sobrecorriente 4 51F. su curva de operación que se muestra en la Figura No. 73., y cuyas características se observan en la Tabla No. 28.

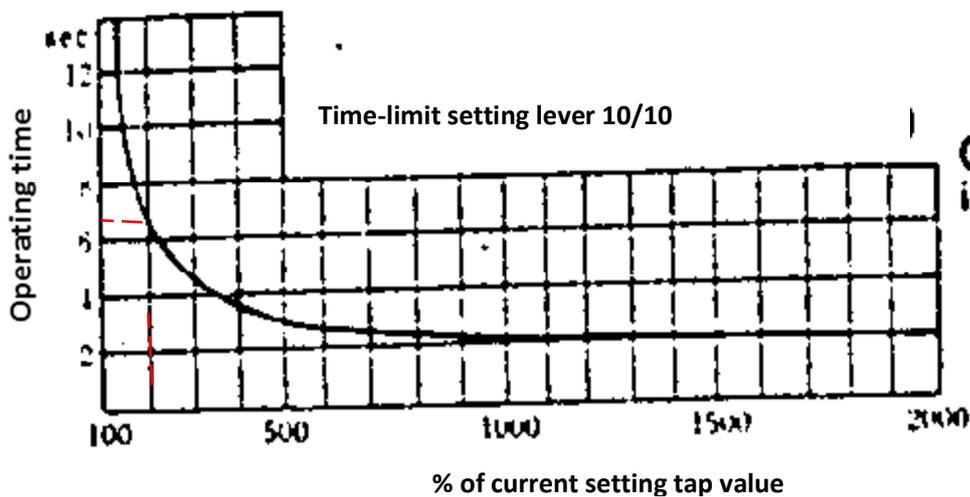


Figura 73. Curva de operación del relé 51F tipo KIO-CP, (Meidensha, 1970).

Tabla 28. Curva de operación del relé 51F tipo KIO-CP

TAP	Tiempo Nominal [s]
2.5 A / 2	6.1

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

El siguiente relé de sobrecorriente es el 64 F tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 74., cuyas características se observan en la Tabla No. 29.

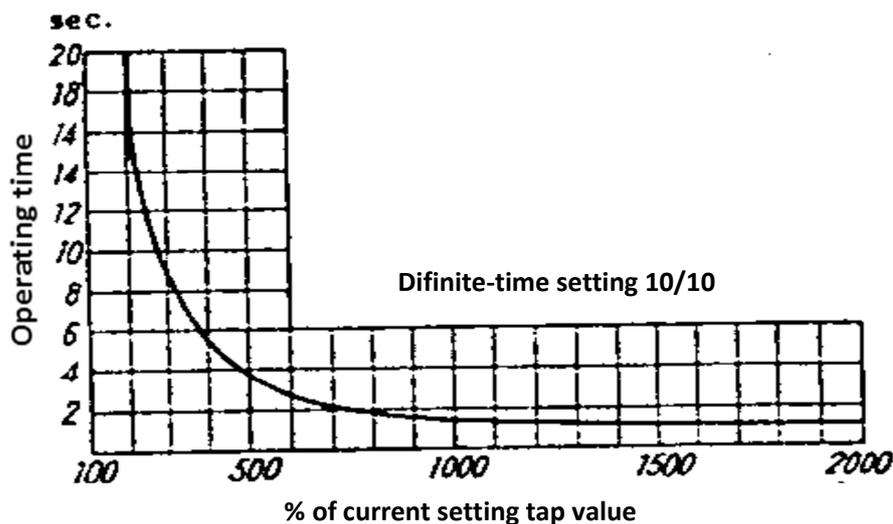


Figura 74. Características del tiempo de operación para el relé KIO-LGP, (Meidensha, 1970).

Tabla 29. Características del tiempo de operación para el relé KIO-LGP.

TAP	Tiempo Nominal [s]
0.35 A / 4	5

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 5.

El relé de sobre voltaje a tierra 64 B tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 75., cuyas características se observan en la Tabla No. 30.

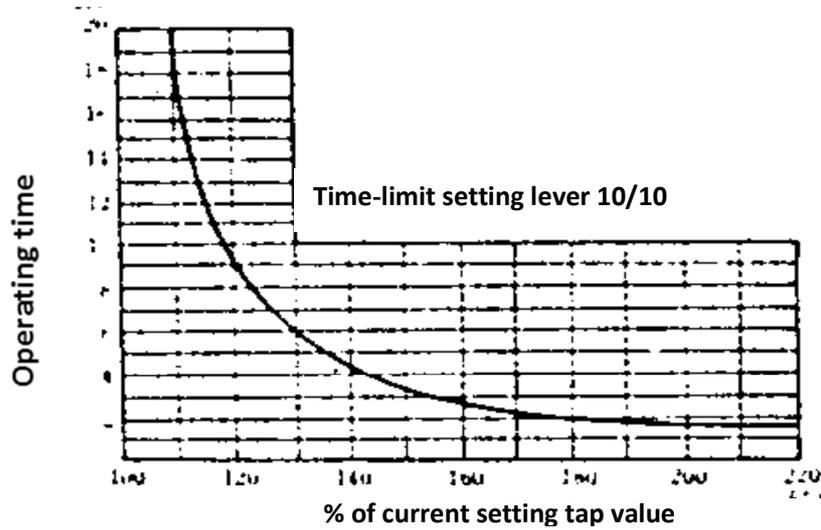


Figura 75. Características del tiempo de operación para el relé KIE₁-KP, (Meidensha, 1970).

Tabla 30. Características del tiempo de operación para el relé KIE₁-KP.

TAP	Tiempo Nominal [s]
40 V / 11	18

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

El relé de bajo voltaje 27 B tiene la curva de operación que se muestra en la Figura No. 76., cuyas características se observan en la Tabla No. 31.

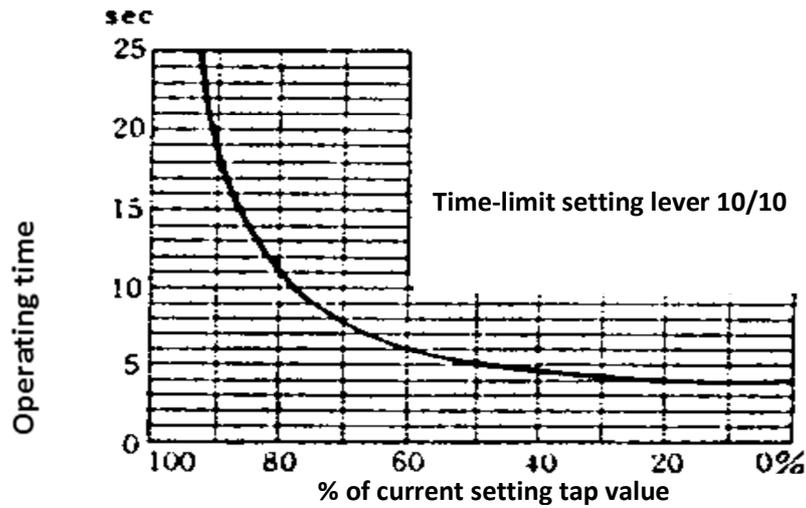


Figura 76. Características del tiempo de operación para el relé tipo KIU-KP, (Meidensha, 1970).

Tabla 31. Características del tiempo de operación para el relé tipo KIU-KP.

TAP	Tiempo Nominal [s]
6	6

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

Tiempo de respuesta de los controladores

A continuación mediante simulación se obtienen los valores de los tiempos de respuesta de los controladores de velocidad y voltaje, ya que son estos los que tomarán el control cuando la unidad de generación entre en operación en isla, además se deben configurar los dispositivos en modo de control Droop para esta aplicación.

La respuesta del controlador con los parámetros de diseño y los ajustes realizados se muestra en las Figuras No. 77, No. 78, No. 79 y No. 80, para el control de velocidad, voltaje, potencia activa y reactiva respectivamente.

CAPÍTULO 5.

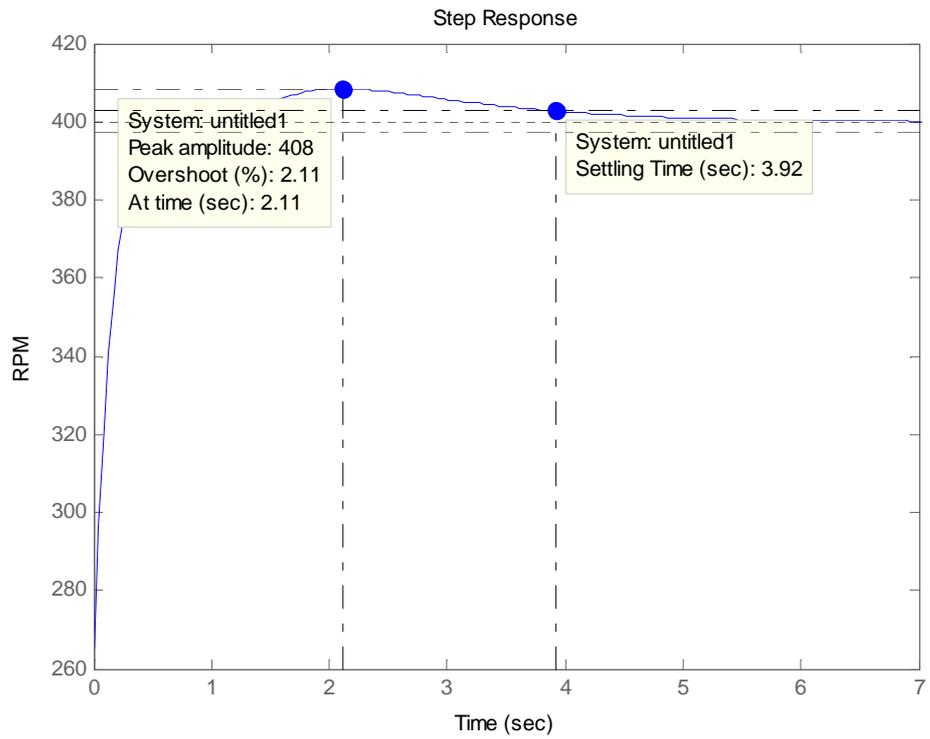


Figura 77. Respuesta del controlador de velocidad a una referencia de 400 rpm.

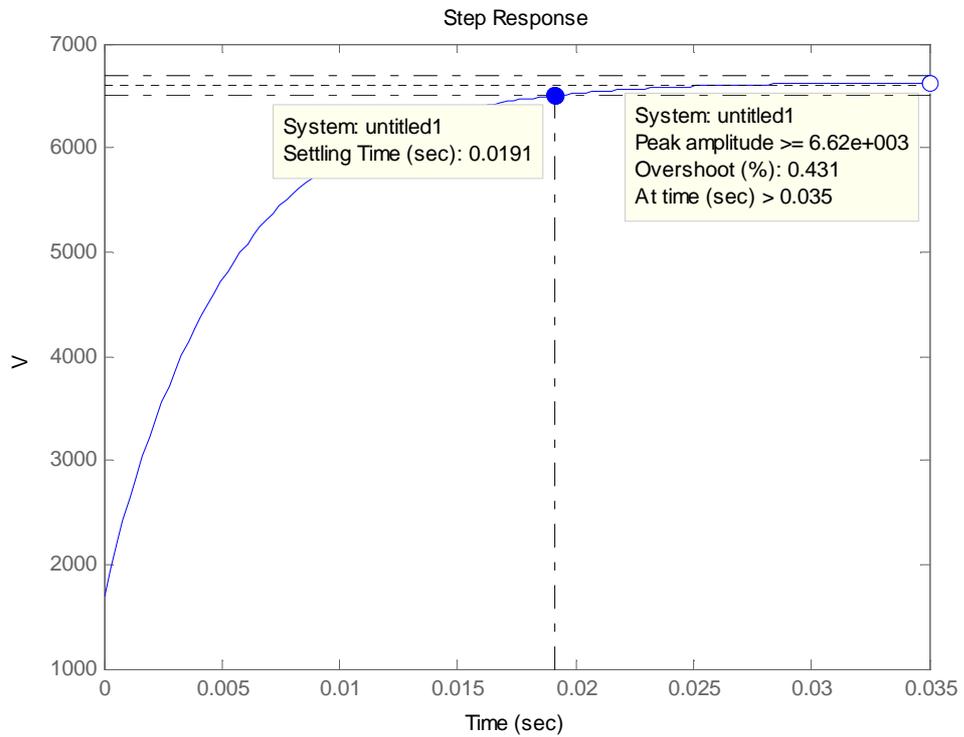


Figura 78. Respuesta del controlador de voltaje a una referencia de 6.6 kV.

CAPÍTULO 5.

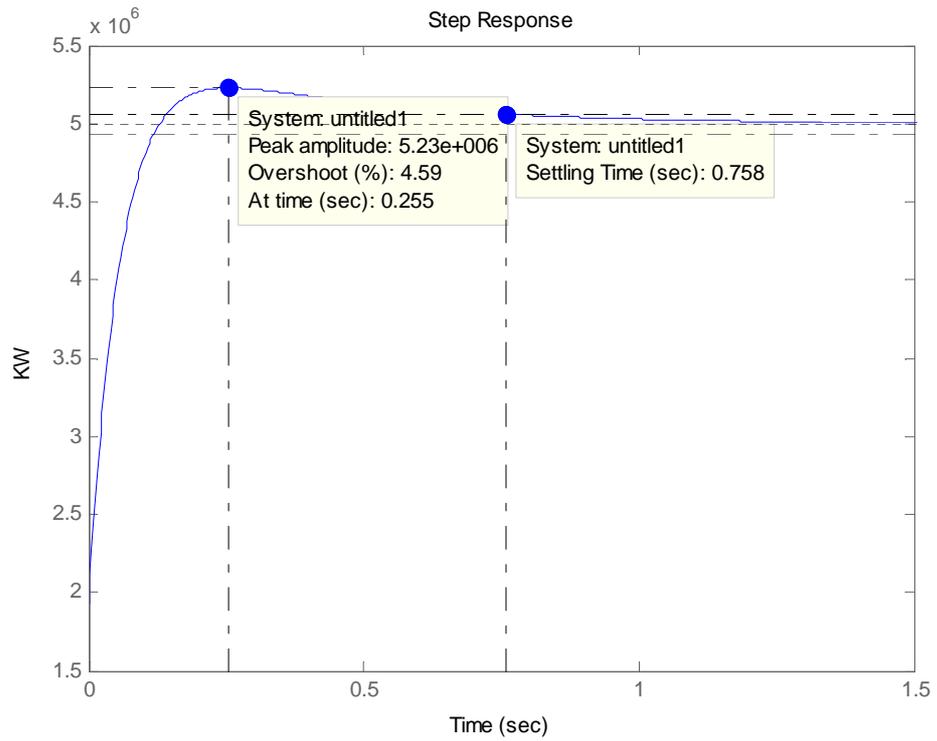


Figura 79. Respuesta del controlador de potencia a una referencia de 5 MW.

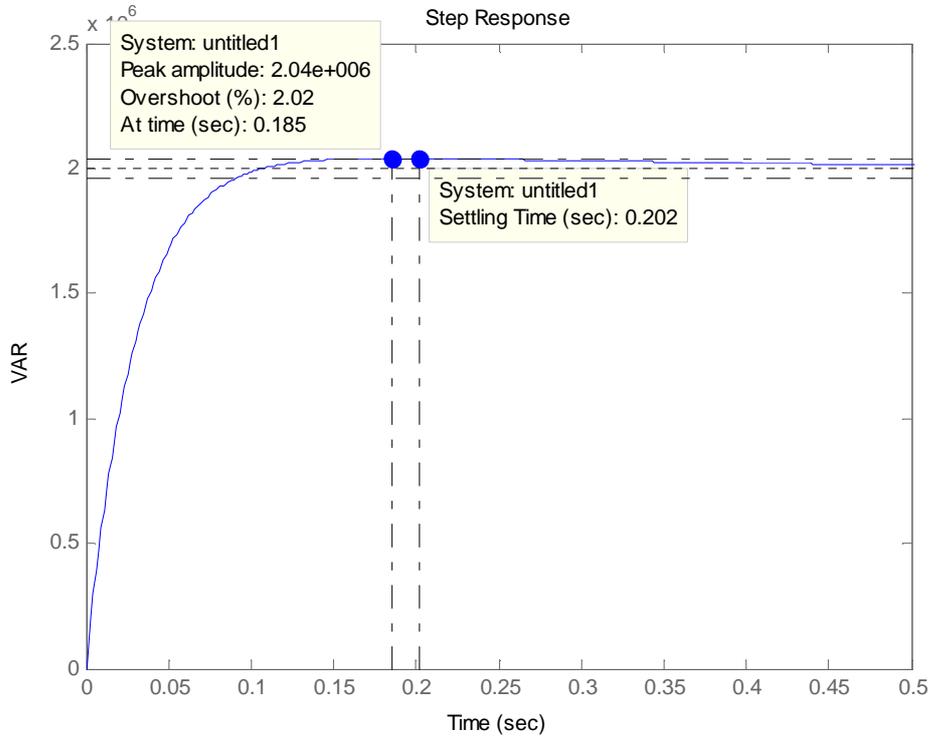


Figura 80. Respuesta del controlador de voltaje a una referencia de 2 Mvar.

CAPÍTULO 5.

Como parte final de este análisis mediante las Tablas No. 32. y No. 33. se describe los tiempos de disparo de las protecciones y respuesta de los controladores.

Las condiciones ideales producidas ante una apertura súbita del relé de distancia son la de sobrevoltaje y sobrevelocidad, es por tal razón que solo se activarán los relés asociados a estas condiciones, por lo tanto, el overshoot de la respuesta el controlador de velocidad debe ser menor a 440 rpm y el tiempo de establecimiento del control de voltaje debe ser menor a 6 los segundos, y es de esta manera que el sistema establecerá condiciones normales de generación en isla.

Tabla 32. Tiempos de disparo de los relés de protección.

Relé de protección	Descripción del relé	En consideración	Tiempo Nominal de disparo
32 G	Potencia inversa	No	1.9
59G	Sobrevoltaje	Si	6
51GN	Sobrecorriente en neutro	No	2.6
46 G	Desbalance de corrientes	No	5
87 G	Diferencial	No	4.5 slope
51 VG	Sobrecorriente	No	2.323
40 G	Perdida de campo	No	
51 F	Sobrecorriente	No	6.1
64 F	Sobrecorriente	No	5
64 B	Sobrevoltaje en tierra	Si	18
27 B	Bajo voltaje	Si	6

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 5.

Tabla 33. Tiempo de estabilización de los controladores.

Controlador	Mp [%]		Tiempo de estabilización [s]
Velocidad	2.11	408 rpm	3.92
Voltaje	0.431	6.62 kV	0.0191
Potencia Activa	4.59	5.23MW	0.758
Potencia Reactiva	2.02	2.04MVAR	0.202

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
 Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 6.

IMPLEMENTACIÓN

6.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VELOCIDAD

Como parte de la ingeniería en control una de las etapas es la implementación, con los valores obtenidos en el diseño y consideraciones obtenidas mediante el análisis del sistema de generación, se establecen y ajustan los parámetros en un controlador electrónico.

La tarjeta electrónica 2301D de la marca Woodward es utilizada para el realizar el control de velocidad y de potencia activa, la cual posee las características técnicas que se muestran en la Tabla No. 34.

CAPÍTULO 6.

Tabla 34. Especificaciones generales de la tarjeta electrónica Woodward 2301D.

Dispositivo:	Controlador Digital de Velocidad y de Compartición de Carga
Marca:	Woodward
Model Number:	2301D
Estilo:	8273 – 501
Puertos de Comunicación:	RS232, RS-422, conector de 9-pines , 1200 a 38400
Señales de entrada y salida:	1 Sensor de carga 1 Controlador para el actuador 1 Sensor de velocidad - MPU 1 Salida analógica configurable 2 Entradas analógicas configurables 8 Entradas discretas (switch, 3 entradas son configurables) 4 Salidas discretas configurables (para relé)
Software:	Servlink Server Watch Window Standard 1.6

Fuente: (WOODWARD, 2003)
Elaborado por: Autores del proyecto

6.1.1 INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD

Alimentación

EL controlador 2301D requiere una fuente de voltaje de entre 18 a 40 Vdc, con una capacidad de corriente de 900 mA.

Conexiones Eléctricas

Todas las entradas y salidas son conectadas a la tarjeta sin la necesidad de tornillos, es recomendable conectar cada uno de los cables con terminales tipo puntera, la abrazadera de resorte que retiene al cable puede ser accionada con un destornillador estándar de punta plana de 2.5 mm. Los bloques terminales aceptan cables de 0.08 a 4 mm². Por razones de interferencia electromagnética se recomienda que los cables de baja corriente sean separados de los cables que conduzcan una alta corriente.

Blindajes de los cables y Conexiones a Tierra

Un bloque terminal es provisto para cada una de las señales que requieran blindaje, como son los cables que llevan la señal del sensor y del actuador. Un terminal para la conexión a tierra como parte de la protección del equipo.

Conexión del transformador de potencial

Se debe conectar los conductores del secundario del transformador a las siguientes terminales:

- Fase A al terminal 1
- Fase B al terminal 2
- Fase C al terminal 3

El voltaje de línea a línea del secundario debe reflejar un voltaje de 90 a 120 o 200 a 240 Vac.

Conexión de los transformadores de corriente

El método standard de conexión de los transformadores de corriente utilizados en este trabajo se ilustran en los planos de conexión en el Anexo 7. PLANOS ELÉCTRICOS Y DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE IMPLEMENTADO, un método alternativo es una conexión de tipo delta para mayor detalle verifique el manual de usuario el equipo.

CAPÍTULO 6.

Líneas para la compartición de carga

Las líneas de compartición de carga permiten conectar otros controladores compatibles, y de esta manera marcar un punto de referencia para que cada generador suministre una misma cantidad de potencia activa a la red, se recomienda utilizar un cable apantallado, los terminales de conexión son el 10 positivo, el 11 negativo y el blindaje en el terminal 12.

El contacto droop debe ser conectado en serie con el contacto auxiliar del interruptor, esta conexión determina la selección de la operación de droop o isócrono, la conexión se la realiza mediante las terminales 34 y 28.

Fuente de Alimentación

Los cables de alimentación deben ser conectados directamente de la fuente de alimentación a la tarjeta, conecte el terminal negativo y positivo a los terminales 46 y 45 respectivamente. Cuando se energiza la tarjeta empieza un ciclo de pruebas internas del arranque del procesador con un tiempo de 30 segundos, mediante un indicador tipo LED cerca de las terminales 27 y 28 se puede ver el estado de este ciclo de prueba, durante este tiempo las I/Os son bloqueadas y no realiza ningún control sobre la máquina motriz.

Entradas Discretas (Terminales 28 - 38)

Las entradas discretas que interactúan con la tarjeta son de tipo switch, estas entradas permiten realizar el control y manejo de potencia bajo una variedad de condiciones, un voltaje positivo es suministrado a la entrada del terminal cuando un contacto o relé se cierra, esto indica un estado de "TRUE" a la tarjeta o "FALSE" cuando el contacto está abierto. Los terminales 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 son específicos como entradas y el terminal 30 es el común para estas entradas.

CAPÍTULO 6.

Las entradas pueden ser alimentadas por una alimentación externa cuando los sistemas de alimentación proporcionan una tensión baja para alimentar el control del 2301D. La fuente de voltaje usada debe ser capaz de suministrar 100 mA en un nivel de voltaje de 18 a 40 Vdc. También es posible utilizar la fuente interna de voltaje de 24 Vdc a través de los terminales 28 y 29, se debe asegurar de conectar el terminal 29 y 30 como se muestra en el diagrama de conexión de la tarjeta.

Cerrar para Arrancar o Mínimo de Combustible (Terminal 31)

El contacto externo usado para la activación de las funciones de la tarjeta es el terminal 31. Esta entrada discreta cambia la operación de control inmediatamente disminuyendo la demanda de combustible a cero. Cuando el switch o relé permanece cerrado, se realiza el control de combustible para mantener la velocidad de la máquina según la velocidad de referencia configurada. Si el contacto es abierto, inmediatamente la demanda de combustible suministrada irá a cero.

Entradas Digitales B, C, D (Terminales 32, 33, 34)

Las siguientes entradas B, C y D son configurables, es decir se les puede asignar según el propósito requerido una función específica;

- Not used
- Failed speed override
- Reset
- Select 2nd dynamics
- Shutdown external
- Idle/rated switch
- Generator Breaker (52G) Isoch

CAPÍTULO 6.

- Use Modbus (for 2301D-EC with Modbus)

Las configuraciones por defecto son las siguientes:

- Entrada discreta B (terminal 32) es configurado para 2 (1,8) Failed speed override.
- Entrada discreta C (terminal 33) es configurado para 6 (1,8) Idle/Rated switch.
- Entrada discrete D (terminal 34) es configurado para 7 (1,8) Generator Breaker droop/Isochronous.

Failed Speed Override, (Anulación de Error de velocidad)

Para habilitar esta función es necesario conectar un contacto en el terminal 32. Cuando el contacto está abierto el control opera normalmente, si el contacto es cerrado anula la señal de error de velocidad, esta función puede ser requerida para el arranque.

La señal de velocidad antes del arranque es inexistente, para máquinas motrices con motores de arranque, la velocidad de arranque es comúnmente suficiente para proporcionar una señal de velocidad, es por esta razón que muchas veces no es necesaria la activación de esta señal durante el arranque de la máquina. En algunos sistemas esta señal durante el arranque deberá estar activada con el propósito de permitir que el actuador proporcione combustible para el arranque. Si la función de anulación de falla en la señal de velocidad es utilizada, el contacto debe ser de tipo momentáneo para asegurar que el apagado (shutdown) por falla en el sensor de velocidad sea habilitado después del arranque.

CAPÍTULO 6.

Reset

Una de los 3 contactos discretos configurables puede ser configurado como reset. El reset es utilizado para resetear las alarmas y apagados (shutdowns).

Se debe considerar que esta función es la misma del software “Reset shutdown” y “Reset Alarms” en el menú C y D respectivamente. Después de que un apagado (shutdown) haya ocurrido esta señal es válida solamente cuando la velocidad de la máquina es cero.

Selección de los 2nd Dinámicos

Uno de los contactos discretos configurables puede ser configurado como selector de los 2nd dinámicos, es útil cuando la máquina trabaja en diferentes modos de operación, este debe ser habilitado mediante software en el menú **Dynamics #2** el parámetro habilita los dinámicos 2 w/CB.

Apagado Interno (Shutdown Internal)

Existen 6 posibles apagados (shutdowns) que afectan la demanda del combustible a través de la salida del actuador, cualquiera de estas condiciones causará que la demanda de combustible vaya al 0%.

- Sobre velocidad
- Falla en MPU
- Falla en la entrada analógica #1
- Falla en la entrada analógica #2
- Modo de prueba
- Apagado externo

CAPÍTULO 6.

Apagado Externo (Shutdown External)

Esta señal puede ser usada para activar una condición de apagado externo, cuando el contacto está abierto, el control opera normalmente, si el contacto se cierra causará que la demanda de combustible vaya al 0 %.

Velocidad Nominal (Rated Speed)

Un contacto puede ser usado para activar la velocidad nominal, esta función viene por defecto con el terminal 33. Esta entrada discreta incrementa la velocidad de referencia cuando está activa y disminuye a la velocidad ralentí cuando esta inactiva. Se puede configurar el porcentaje de incremento o decremento mediante el tiempo de aceleración configurable por software, cuando el sistema está conectado a la red esta función es deshabilitada.

Switch por software del Idle/Rated

Es posible utilizar el switch del software para ir del Idle al Rated mediante la configuración adecuada de una las entradas.

Contacto CB Aux/Droop

Esta entrada tipo switch o relé en el terminal 34 es conectada para activar el control de carga, esta entrada discreta es usada para seleccionar el control a modo isócrono o droop, por lo general se conecta en serie con un contacto auxiliar del interruptor del generador. Si el contacto está abierto se selecciona el modo droop, y si se cierra el contacto ira al modo carga base o isócrono.

CAPÍTULO 6.

Este comando es normalmente usado para seleccionar los 2nd dinámicos, Si esta señal y la función de ENABLE DYNAMICS 2 W/CB es habilitada por software, los parámetros ingresados en los 2nd dinámicos son seleccionados para realizar el control.

Contacto de Raise Speed/Load, Contacto de Lower Speed/Load (Terminales 35,36)

Estos contactos en las terminales indicadas permiten incrementar o disminuir el valor de la referencia de la velocidad cuando se efectúa el control de velocidad, y analógicamente cuando se efectúa el control de carga al instante de la conexión del generador a la barra. Los valores mínimos y máximos durante los cambios en la referencia por la acción de estas señales es limitada por software.

Carga del generador (Terminal 37)

Esta entrada es usada para activar el comando de control de carga, esta entrada realiza un decremento o incremento según e modo de operación seleccionada. Si el estado de la entrada es "TRUE", la función de control de carga incrementa o decrementa hasta lograr la operación en Isócrono o Carga Base, si esta señal es "FALSE" la función de control de carga incrementa o decrementa hasta llegar a un nivel de disparo de descarga "Unload trip level".

Modo Carga Base (Terminal 38)

Esta señal permite activar el modo de operación Carga Base, en este modo de operación el governor controlará la carga del generador, al estar en este modo de operación, la barra o un generador isócrono efectúan el control de la frecuencia.

CAPÍTULO 6.

Salida del actuador

La señal provista por el controlador para el actuador es a través de los terminales 13(+), 14(-) y 15 para el apantallamiento del cable. El rango de corriente para el actuador es configurado por software, dependiendo del actuador se tiene señales de 0-200 mA o 0-20 mA.

Entradas Analógicas

Las dos entradas analógicas disponibles son “Analog Input #1” (terminales 19-20) y “Analog Input #2” (terminales 22-23) pueden ser configuradas dependiendo de la aplicación deseada.

1. No usado
2. Referencia remota de velocidad
3. Referencia en Carga Base
4. Entrada para sincronizar (-2.5 a +2.5 Vdc)
5. Entrada auxiliar (-2.5 a +2.5 Vdc)
6. Entrada del limitador del MAP

La opción 2 permite enviar un valor de referencia remota de velocidad cuando se realiza el control de velocidad y el control de carga cuando el generador se encuentra en el modo de operación droop; la opción 3 permite enviar un valor de referencia remota cuando se efectúa el control de carga en modo Carga Base, las otras opciones tienen relación con dispositivos auxiliares para el control, sincronismo y condiciones de presión.

Sensor de Velocidad (Terminales 25-26)

A través de estas terminales se conecta un sensor magnético.

CAPÍTULO 6.

Salidas para conexión a relés (Terminales 41–44)

En particular la tarjeta provee de cuatro canales de control para salidas discretas para relés, con un máximo de corriente de 200 mA. A través de la activación de las compuertas internas que alimentan al relé conectado al terminal, para mayor detalle verifique el esquema de conexión, estas salidas pueden ser configuradas para las siguientes funciones:

- Apagados (shutdowns)
- Alarmas
- Pruebas de disparo por sobrevelocidades
- Limitador de combustible en el arranque
- PID de velocidad en control
- Circuit Breaker abierto
- Sobrecarga
- Switch de nivel (Velocidad, referencia de velocidad, limitador en el arranque, Actuador, Carga en el generador)
- Pruebas para forzamiento de salidas

Salida Analógica #1 (Terminales 16-17)

Esta salida puede ser configurada en el rango de 0-20 mA o 4-20 mA dependiendo de la aplicación requerida, la salida de la corriente fluye a través de las terminales 16(+) y 17 (-), esta salida analógica permite ser configurada para las siguientes funciones:

- Velocidad del motor
- Referencia de velocidad del motor
- Demanda de combustible
- Salida del generador
- Porcentaje de carga del sistema

CAPÍTULO 6.

- Entrada del sincronizador
- Entrada analógica #2
- Señal del bias de velocidad
- Referencia de carga base

Puerto de comunicación

Este puerto de comunicación es usado para configurar los parámetros, también es usada para la comunicación Modbus con las consideraciones establecidas en la hoja técnica de la tarjeta 2301D.

Actuador UG-A

El actuador que se utiliza en el nuevo lazo de control para regular el ingreso de flujo de combustible es el actuador UG-Actuator, se lo puede observar en la Fotografía 3, el cual se controla electrónicamente mediante la señal de 0 – 200 mA suministrada por el regulador de velocidad Woodward 2301D. En la Tabla No. 35, se observa las características técnicas del nuevo actuador.



Fotografía 3. Actuador UG-Actuator para el control de velocidad de la UG4

CAPÍTULO 6.

Tabla 35. Características del actuador UG-Actuator utilizado en la UG4

Fabricante:	Woodward
Gama:	UG-Actuator
Modelo:	TIPO UG – 40
Serie:	168887
Capacidad máx.:	20 J(15 lb-pie)
RPM:	375 a 1100 rpm, bomba de baja velocidad 600 a 1500 rpm, bomba de alta velocidad

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)

Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 36. Características del PLC Twido y el módulo de ampliación

PLC TWIDO	
Marca:	Schneider Electric
Gama:	Twido
Modelo:	TWDLCDE40DRF
Alimentación:	24 VDC
Descripción salidas y entradas:	24 entradas de 24 VCC 14 salidas de relé de 2 A 2 salidas de transistor de 1 A
Comunicación:	Ethernet Rs232
MODULO ENTRADAS/SALIDAS ANALÓGICAS	
Marca:	Schneider Electric
Gama:	Twido
Modelo:	TWDAMM6HT
Descripción:	Modulo de ampliación con: 4 entradas analógicas 2 salidas analógicas (0 – 10 V, 4 – 20 mA), 12 bits

Fuente: (Schneider Electric, 2008)

Elaborado por: Autores del proyecto

Además del controlador Woodward 2301D que se lo puede observar en la Fotografía No. 4, se requiere de un controlador lógico programable (PLC), el cual se encargará de realizar la rampa de carga cuando el generador ingrese en paralelo. El PLC escogido tiene las características que se muestran en la Tabla 36., también en ésta tabla se muestra las características del módulo de entradas y salidas analógicas.

El PLC marca Twido instalado en la sala de control para el control de la UG4 se puede observar en la Fotografía No. 5. En la Fotografía No. 6. se

CAPÍTULO 6.

muestra las señales de entrada y salida utilizadas, y en la Fotografía No. 7. el módulo de ampliación del cual se usa una señal de entrada analógica y dos de salida.



Fotografía 4. Regulador de Velocidad instalado, Woodward 2301D

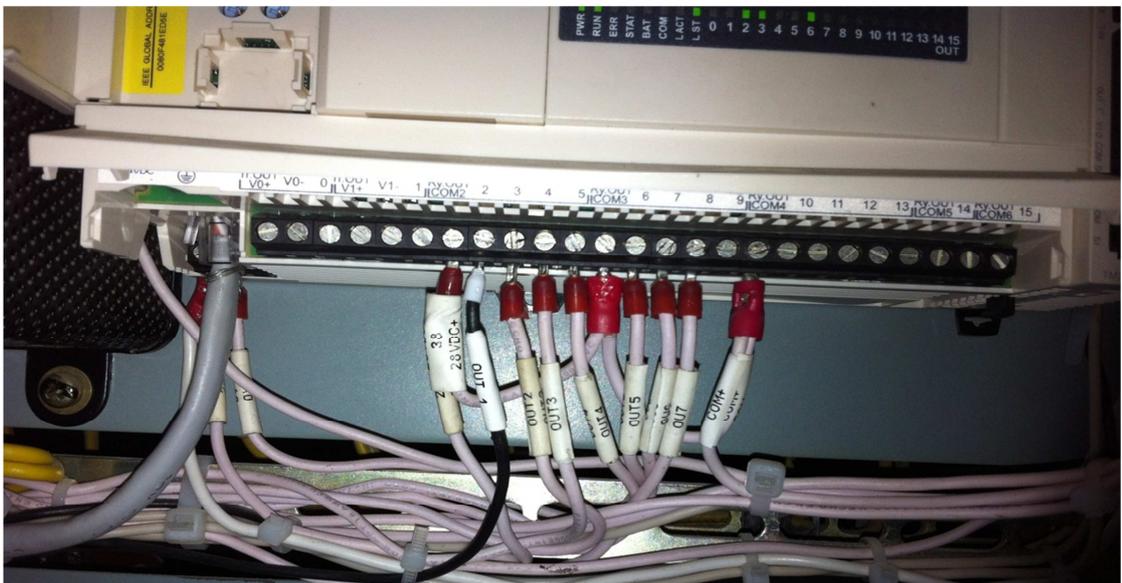


Fotografía 5. PLC instalado en el panel de control de la UG4, Twido

CAPÍTULO 6.



(a)



(b)

Fotografía 6. Cableado de las señales de entrada y salida del PLC, twido instalado en el panel de control de la UG4 (a) Entradas (b) Salidas

CAPÍTULO 6.



Fotografía 7. Módulo de ampliación de salidas y entradas analógicas instalado en el panel de control de la UG4, Twido

Debido a que el voltaje con el que se trabaja en la sala de control es de 125 VDC, se debe utilizar una fuente de 24 VDC para alimentar el PLC, y todos los dispositivos que necesiten esta tensión, como los relés para lectura de señales de 125 VDC a 24 VDC, señales que ingresan al PLC. Las características de la fuente de alimentación se muestran en la Tabla No. 37. y en la Fotografía No. 8., se observa la fuente instalada en el panel de control de la UG4.

Tabla 37. Características de la fuente de alimentación utilizada en el panel de control de la UG4

Marca:	Weidmuller
Gama:	PRO – M
Tipo:	CPM SNT 120W 24V 5 ^a
Tensión Nominal de Salida:	24 VDC
Corriente de salida:	5 A
Tensión de entrada DC:	80 V mínimo 370 V máximo
Tensión de entrada AC:	85 V mínimo 264 V máximo

Fuente: (WEIDMULLER, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto



Fotografía 8. Fuente de alimentación de 24 VDC, Weidmuller

Los planos de la instalación del sistema controlador de velocidad se encuentran en el Anexo 7. PLANOS ELÉCTRICOS Y DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE IMPLEMENTADO. Los materiales utilizados en la instalación se detallan en el Anexo 3. LISTA DE MATERIALES PARA LA INSTALACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD Y DE VOLTAJE.

6.1.2 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS

6.1.2.1 Configuración del controlador de velocidad Woodward

Mediante el software Watch Window se ajustan los parámetros para el control de la máquina motriz, este software es un cliente de Servlink Server, (WOODWARD, 2003), después de haber instalado correctamente los dos

CAPÍTULO 6.

programas se procede a definir y ajustar cada uno de los parámetros según las necesidades requeridas.

Para realizar los ajustes respectivos, este equipo posee dos menús, el de configuración y el de servicio, con cada uno de estos parámetros se especifica las características de la máquina, la configuración de las entradas y salidas tanto digitales y analógicas, especificaciones de la instrumentación y el monitoreo de las variables de control. Los parámetros configurados en el Woodward se los ha hecho de acuerdo a las especificaciones mencionadas anteriormente en este capítulo y con las características del generador UG4 establecidas en capítulos anteriores. La configuración completa se encuentra detallada en el Anexo 2. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE.

Es importante mencionar que los parámetros del controlador PID que se deben ingresar en la configuración del Woodward, es la constante proporcional K_c , el periodo integral T_i , y el periodo derivativo T_d , que se encuentran representados en el menú de configuración como Gain, Reset y Actuator Compensation respectivamente, los parámetros PID configurados en el dispositivo Woodward 2301D se encuentran en la Tabla No. 38.

Tabla 38. Parámetros configurados en la implementación del dispositivo Woodward 2301D

	Velocidad	Potencia Activa
Kp	20.6	40.66
Ti [seg.]	0.9	0.64
Td [seg.]	0.22	0.15

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 6.

6.1.2.2 Programación del software del controlador

Como se ha mencionado en la sección anterior se requiere de un PLC para realizar la rampa de entrada y de salida de la UG4, para esto se ha escogido el PLC Twido el cual tiene su propio software Twido Suite, que tiene un lenguaje de programación ladder.

Se abre el software Twido Suite en *Modo Programación*, modo que se escoge en la primera ventana del software, una vez ahí se crea un nuevo proyecto como se puede observar en la Figura No. 81., escogiendo la dirección en la que el proyecto se va a guardar.

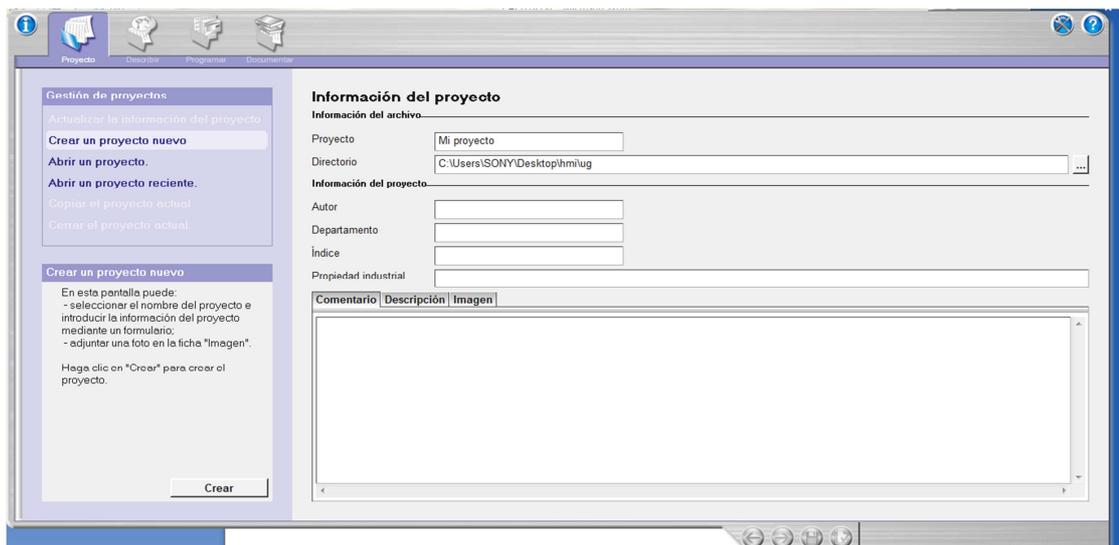
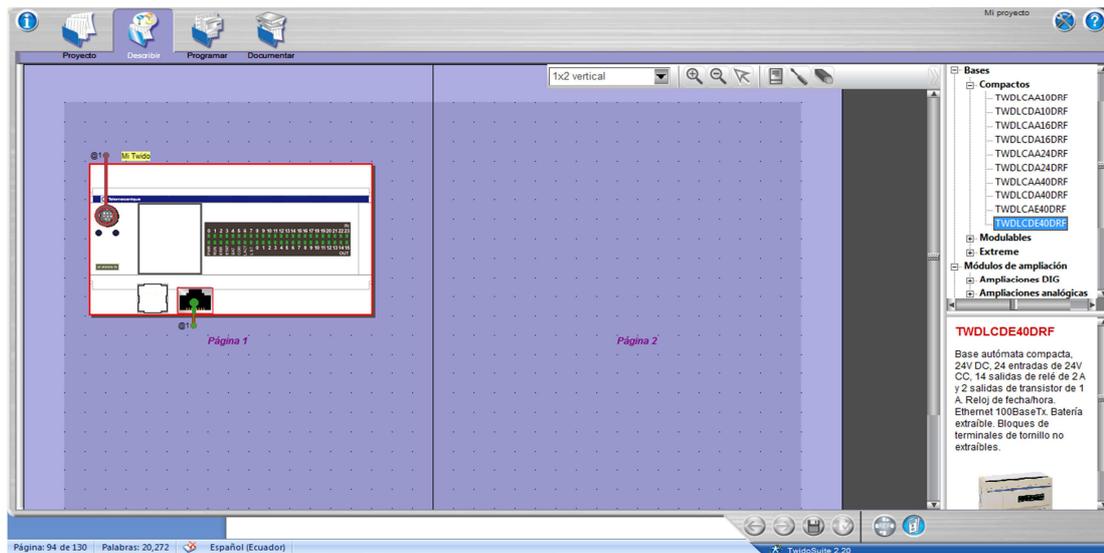


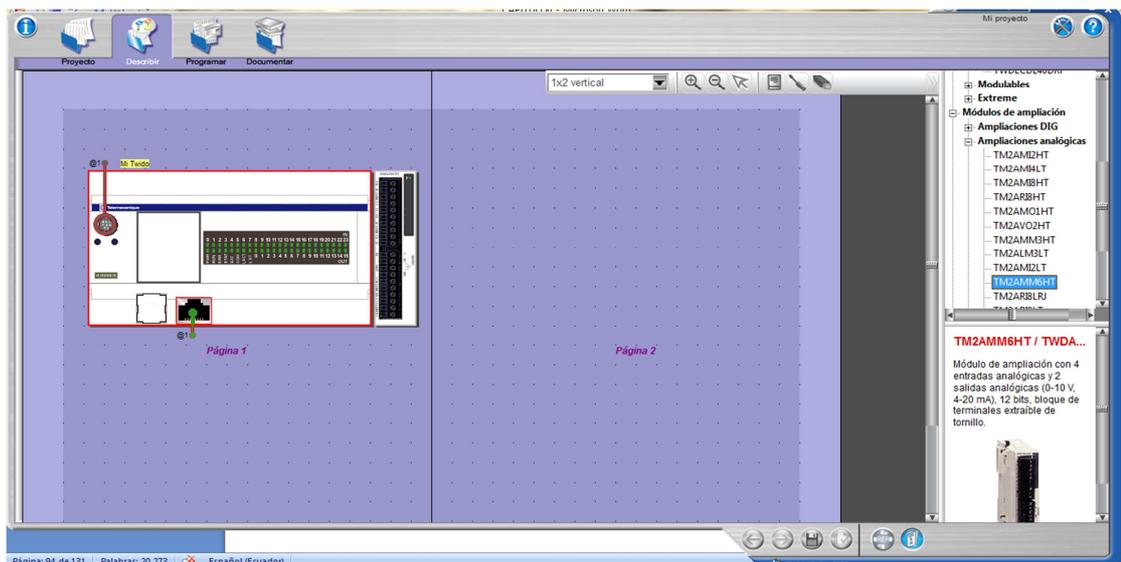
Figura 81. Crear un proyecto en el Software Twido Suite

En la ventana *Describir* se deberá ingresar las especificaciones del PLC, ya que es un software propio de Twido se encuentran los equipos específicos que se está utilizando así como los módulos, para escoger el PLC y el módulo en la parte derecha de la ventana se encuentra las *Bases*, donde se encuentra el PLC y los *Módulos de Ampliación*, se selecciona dando clic y arrastrándolo a la parte izquierda, como se muestra en la Figura No. 82.

CAPÍTULO 6.



(a)



(b)

Figura 82. Selección del PLC y el módulo de ampliación en el software Twido Suite, (a) PLC, (b) Módulo de Ampliación

Si se le da doble clic en el PLC o en el módulo se puede escribir nombres en las direcciones de entradas y salidas como se muestra en la Figura No. 83.

CAPÍTULO 6.

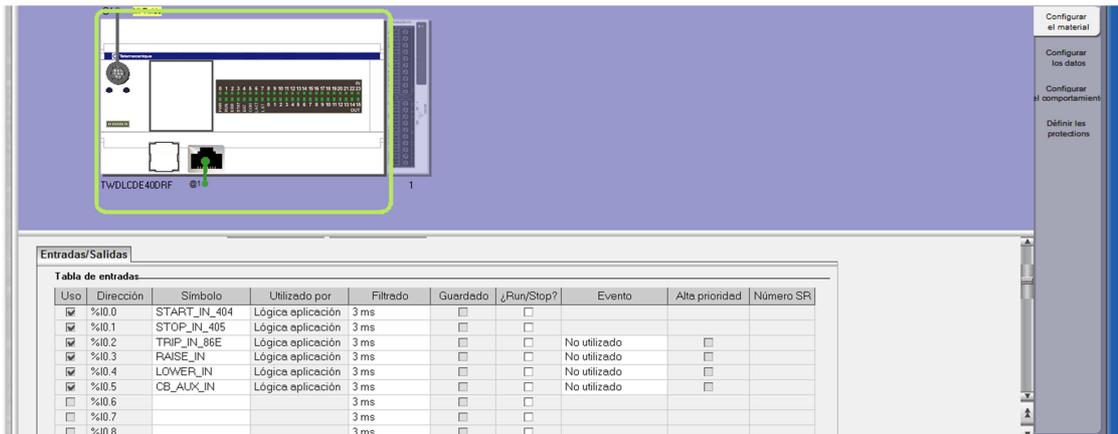


Figura 83. Entradas y Salidas del PLC en el software Twido Suite

Para iniciar con la programación en la ventana *Programar* se observa dos partes, en la parte izquierda se encuentra los nombres de las secciones y subrutina, y en la parte derecha se encuentra la programación de cada sección y cada subrutina programada, esto se lo puede observar en la Figura No. 84.

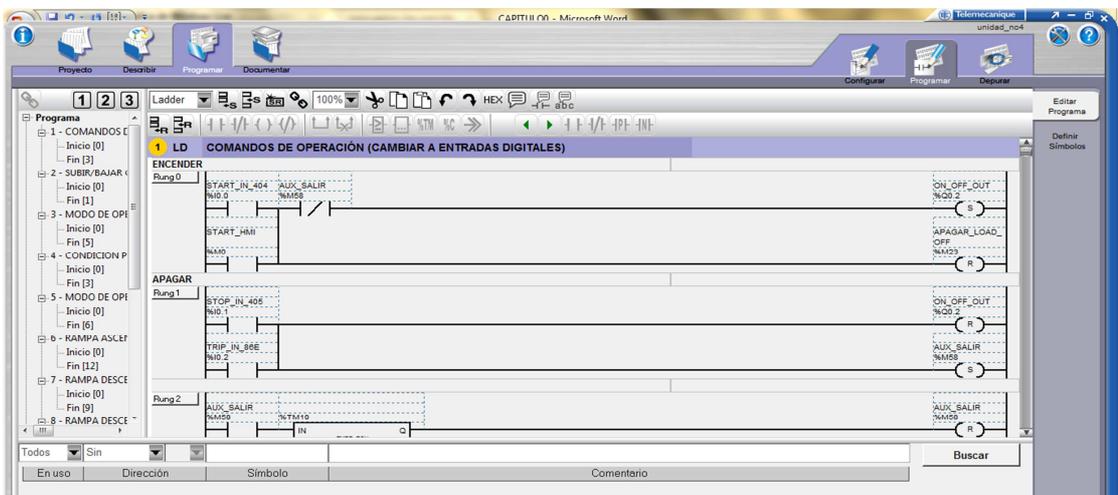


Figura 84. Sección de programación en el software Twido Suite

Para descargar el programa en el PLC, se lo puede realizar por Ethernet o rs-232, en la ventana *Depurar* se selecciona el tipo de conexión como se muestra en la Figura No. 85 y se da clic en aceptar, seguidamente se abrirá una

CAPÍTULO 6.

ventana en la que se selecciona *PC a controlador lógico programable*, y clic en aceptar.

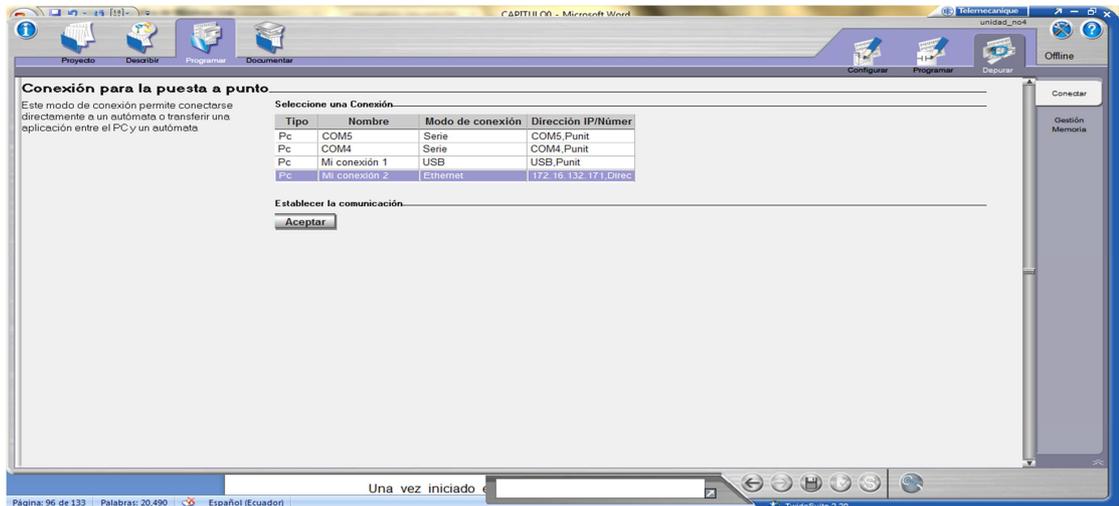


Figura 85. Depuración del programa en el PLC

Una vez iniciado el proyecto se prosigue a programar el PLC, con los requerimientos que se necesita para que el controlador funcione adecuadamente, estos requerimientos son los siguientes;

- El programa debe permitir encender y apagar el controlador Woodward.
- Desde el HMI se podrá subir y bajar la carga y la velocidad, y también con los selectores del panel de control.
- Se podrá cambiar el modo de operación de carga base a modo Droop, desde el HMI, y cambiar el valor de la consigna en modo carga base
- Se debe realizar la rampa ascendente y descendente de carga
- En la salida de paralelo se debe dejar la velocidad en 400 rpm, y desde el HMI el operador podrá cambiar a 200 rpm.
- Desde el HMI el operador puede cambiar la velocidad de 400 a 200 rpm o viceversa.

CAPÍTULO 6.

Tomando en cuenta dichos requerimientos se realizó el programa en ladder, el algoritmo de programación se lo representa en tres diagramas de flujo que corresponden a la rampa de arranque, a la rampa de salida, modo carga base y Droop, los cuales se los pueden observar en las Figuras No. 86, No. 87, y No. 88 respectivamente.

El programa en ladder del PLC de la UG4 se encuentra en el Anexo 1. PROGRAMA DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC), TWIDO PARA EL REGULADOR DE VELOCIDAD, además se especifican algunos detalles del programa como las variables utilizadas y los comandos.

6.1.3 INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI) PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

El diseño del HMI se realizó en base a la guía GEDIS, la cual se detalla en la Tabla 39.

En el caso de la sala de control de la central termoeléctrica Guangopolo, el HMI se encuentra desarrollado, debido a esto; puntos como la arquitectura, tablas y gráficos de tendencias y alarmas no se tomará en cuenta en el diseño.

Tabla 39. Aspectos considerados en la guía GEDIS para el diseño de HMI

1.	Arquitectura
2.	Navegación
3.	Distribución
4.	Color
5.	Texto
6.	Equipos
7.	Valores
8.	Tablas
9.	Comandos e Ingreso de Datos
10.	Alarmas

Fuente: (GUIA GEDIS)

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 6.

 <p>Corporación Eléctrica del Ecuador UNIDAD DE NEGOCIO TERMOPIC-INGHA</p>	<p>PROGRAMA DEL PLC MARCA TWIDO PARA EL REGULADOR DE VELOCIDAD WOODWARE</p>	<p>Fecha de Elaboración: 17/10/2013 Fecha de última revisión: 04/11/2013 Página: 1</p>
---	---	--

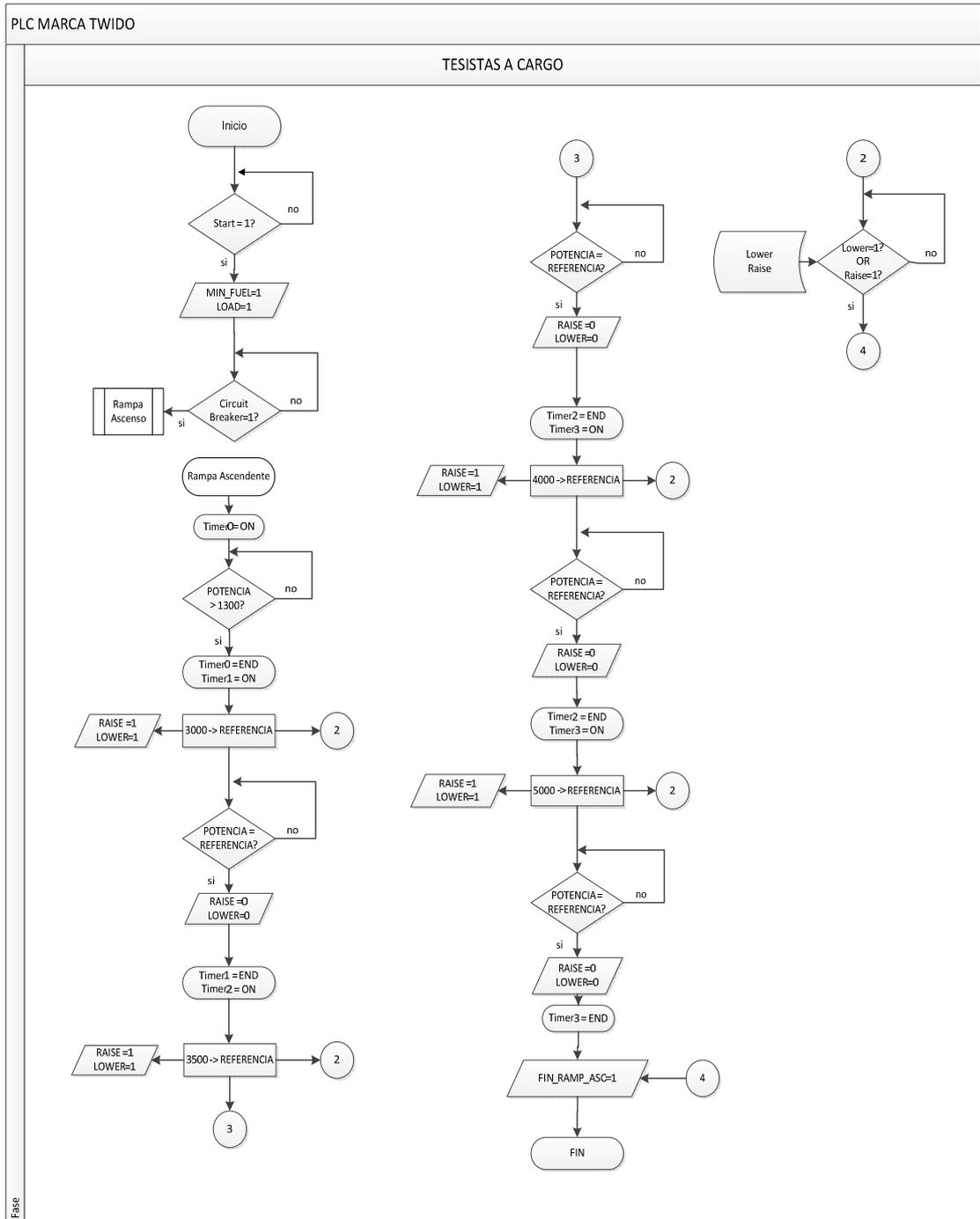


Figura 86. Diagrama de Flujo de la Rampa de arranque de la UG4

CAPÍTULO 6.

 <p>Corporación Eléctrica del Ecuador UNIDAD DE NEGOCIO TERMOELECTRICA</p>	<p>PROGRAMA DEL PLC MARCA TWIDO PARA EL REGULADOR DE VELOCIDAD WOODWARE</p>	<p>Fecha de Elaboración: 17/10/2013 Fecha de ultima revisión: 04/11/2013 Página: 2</p>
---	---	--

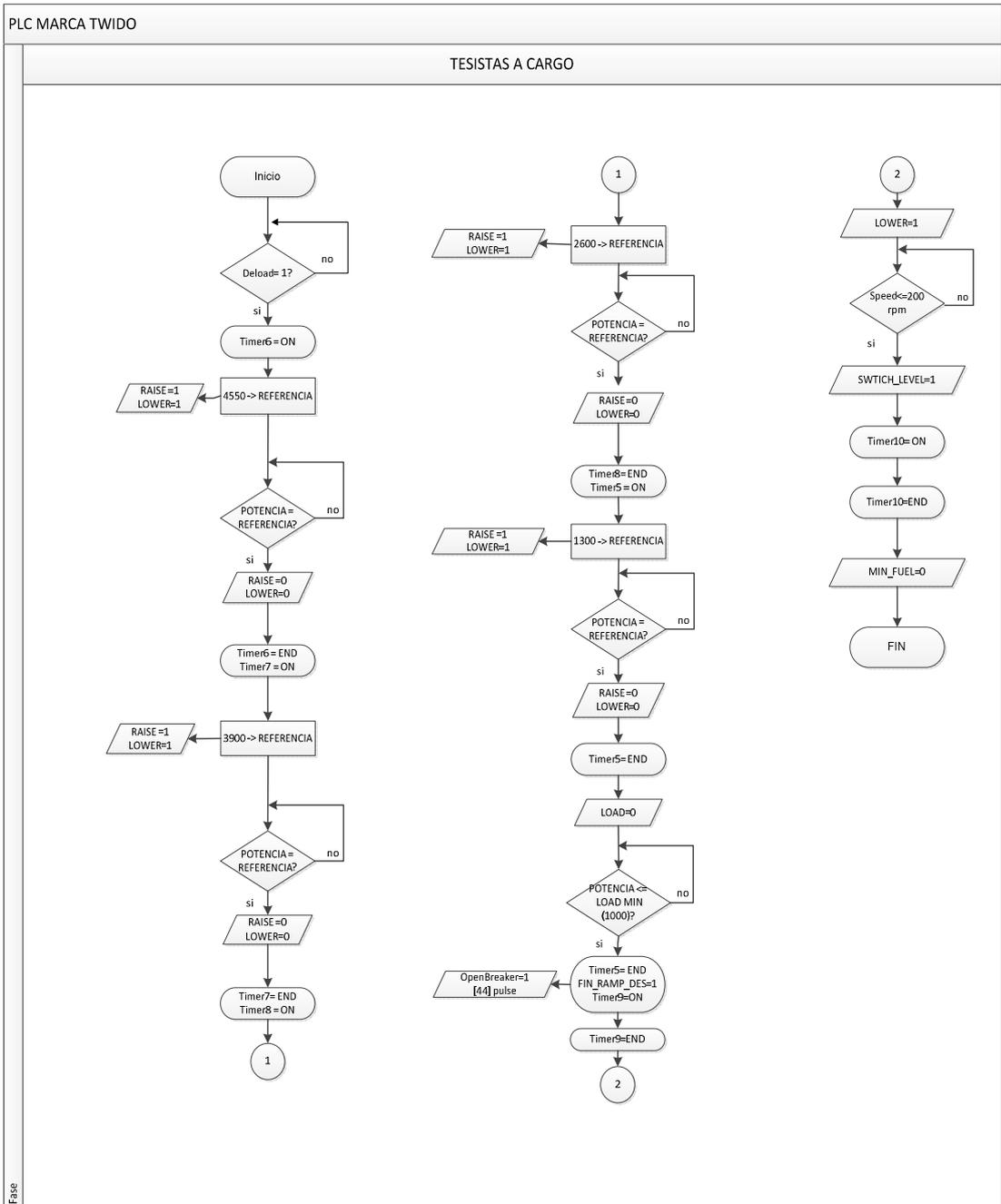


Figura 87. Diagrama de Flujo de la rampa de salida de la UG4

CAPÍTULO 6.

 <p>CELEC EP Corporación Eléctrica del Ecuador UNIDAD DE NEGOCIO THERMOPICHINCHA</p>	<p>PROGRAMA DEL PLC MARCA TWIDO PARA EL REGULADOR DE VELOCIDAD WOODWARE</p>	<p>Fecha de Elaboración: 04/03/2012 Fecha de última revisión: 04/03/2012 Página: 1</p>
---	---	--

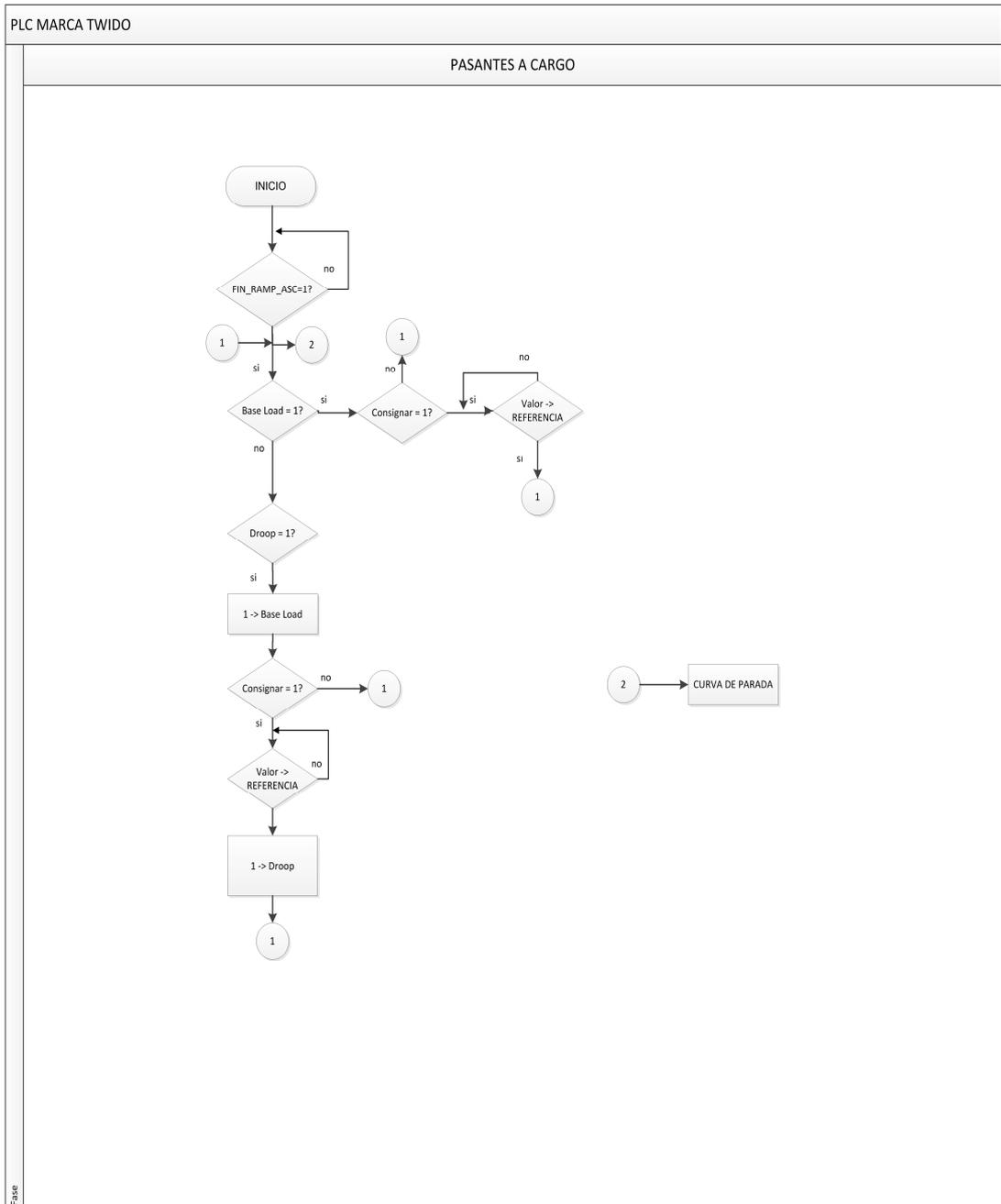


Figura 88. Diagrama de Flujo del Modo Carga Base y Modo Droop

CAPÍTULO 6.

Distribución

Primero se debe tomar en cuenta que solo se realizará una ventana, misma que se incluirá en el HMI de la sala de control, razón por la cual solo tendremos una clase de pantalla

En esta ventana se excluirá componentes tales como el título, el logotipo de la empresa, la hora y la fecha, debido a que estos ya se encuentran incluidos en a interfaz ya existente.

Entonces la plantilla de la ventana quedaría de la manera que se muestra en la Figura 89.

Navegación

Para la navegación se utilizarán los elementos que se detallan en la Tabla No. 40.

Color

En esta sección se consideró los colores recomendados en la guía GEDIS, sin embargo se tomó en cuenta los colores estándares que se utilizan en la interfaz ya desarrollada, a partir de esto, los colores utilizados se muestran en la Tabla No. 41.

Texto

La información textual es el medio por el cual la información del proceso es presentada al usuario, en el caso de la ventana del diseño se utilizará texto.

La fuente y las características que se utilizarán son las que se muestra en la Tabla No. 42.

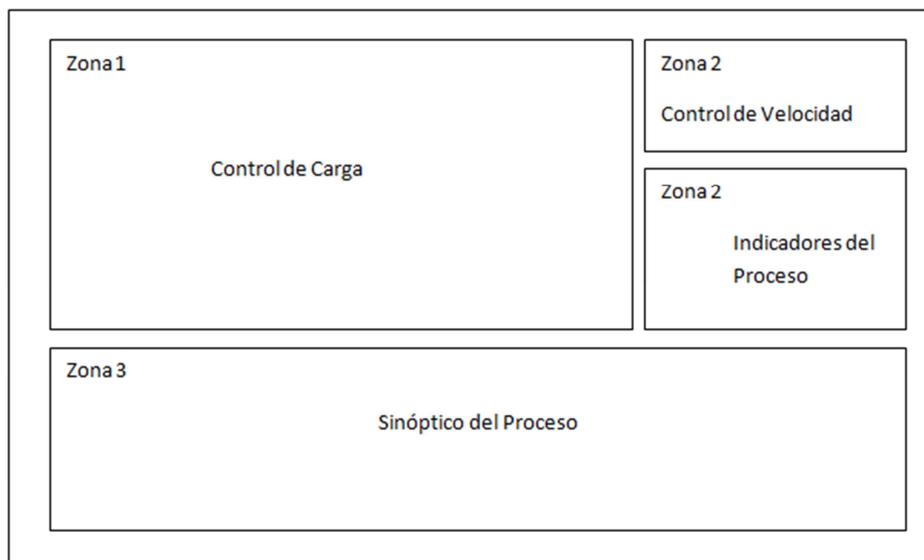


Figura 89. Plantilla de la ventana de Control de Velocidad

Estatus de Equipos y Eventos de Proceso

En esta sección se determinan los símbolos que se van a utilizar en la pantalla. Ahora en la Tabla No. 43. se establecen los indicadores y botones que se utilizarán.

Tabla 40. Navegación de la ventana de Control de Velocidad

Elemento	Descripción
Barra de Botones	Servirá para realizar acciones como parar la rampa, salir de paralelo o ir a la velocidad de 200 RPM, o 400 RPM
Barra de Íconos	Servirá para la asignación de carga que se desea consignar
Ingreso de Datos	Ingreso del valor de carga que se desea consignar
Zona 1	Ubicación para realizar todo lo referente a la consignación de carga, tanto con ingreso de datos o selección de carga
Zona 2	Ubicación para realizar todo lo referente al control de la velocidad
Zona 3	Zona en la que se puede visualizar el estado de los indicadores de control tales como el indicador de carga, subida o bajada
Zona 4	Zona en la que se encuentra la rampa de carga, la cual representará cada etapa de dicha rampa

Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 41. Estándar de Colores utilizado en la ventana de Control de Velocidad

Color	Descripción
	Fondo de Pantalla
	Estatus de Equipos
	Parado
	Trabajando
	Texto
	Subtítulos de Pantalla
	Texto en general

Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 42. Detalles del texto utilizado en la ventana de Control de Velocidad

Subtítulos	
Tamaño	14
Fuente	SansSerif
Negrita	No
Texto en General	
Tamaño	12
Fuente	SansSerif
Negrita	No

Elaborado por: Autores del proyecto

Valores

En esta sección se definen los datos útiles a ser mostrados para el operador, en este caso es necesario tener los valores reales de la velocidad en RPM y de la carga (Potencia Activa en KW). Además se indicará información del estado del proceso, como la que se observa en la siguiente lista:

CAPÍTULO 6.

- Valores de Carga [KW] y Velocidad [RPM]
- Estado de la tarjeta, es decir, si el regulador de velocidad (WOODWARD) se encuentra encendido o no
- Estado del disyuntor o circuit breaker
- Estado de variables de control como; la carga, la subida y la bajada
- Además se indicará al operador cuando su consigna o el valor de carga deseado sobrepasa el límite de carga de generación
- Se realizará una gráfica que represente la rampa que sigue el generador, de acuerdo a como ésta vaya incrementando o disminuyendo su valor de carga, para facilitar al operador en que parte del proceso se encuentra el generador tanto en el arranque como en la parada

Comandos e Ingreso de Datos

En esta sección se establece la intervención del operador al suministrar datos al sistema para que se comporte de una cierta manera.

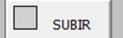
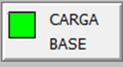
Considerando lo anteriormente mencionado se analiza hasta que punto debe el operador intervenir en el comportamiento del sistema. Entonces el operador solo ingresará un dato o seleccionará el mismo en la ventana de control este dato es:

- El valor de carga a consignar, este dato debe estar especificado en kilovatios [KW]

Finalmente la Interfaz Humano máquina se ve como se muestra en la Figura No. 90.

CAPÍTULO 6.

Tabla 43. Indicadores y Botones de la ventana de Control de Velocidad

Símbolo	Descripción
	Botones para selección de modos, subir, bajar
	Apagado
	Encendido
Indicadores de estado en general	
	Apagado
	Encendido
	Botones para consignación

Elaborado por: Autores del proyecto



Figura 90. Interfaz Humano Máquina del Regulador de velocidad de la UG4

6.1.4 PUESTA EN MARCHA

Para la puesta en marcha se toma en consideración los siguientes puntos antes de poner en funcionamiento el sistema completo:

- Verificación de conexiones:

Es importante verificar que las conexiones se encuentren correctamente realizadas, para ello antes de conectar la fuente de alimentación se debe verificar que efectivamente la tensión que entregue sea de 24 VDC, y que la polaridad sea correcta en todos los puntos de conexión, además es importante verificar que los cables se encuentren asegurados y que no existan cortos en la conexión verificando continuidad en todos los puntos de conexión.

- Verificación de la lógica del programa del PLC y HMI

Se debe verificar que las señales lleguen correctamente desde el HMI al PLC y en el caso del selector de subir y bajar desde el panel de control y que éstas señales se conecten adecuadamente cumpliendo las condiciones eléctricas, es decir que tengan concordancia de variables tanto en el PLC como en el HMI.

- Puesta en marcha

Para la puesta en marcha del regulador de velocidad se realizaron una serie de pruebas para demostrar su correcto funcionamiento antes de que el controlador digital opere en forma permanente, estas pruebas se detallan en el capítulo 7, los datos de configuración, con los ajustes requeridos de acuerdo a las pruebas realizadas, se encuentran funcionando en el sistema de control de velocidad implementado, ésta configuración se

CAPÍTULO 6.

detalla en el ANEXO 2. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE.

6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA CONTROLADOR DE VOLTAJE

Como se había mencionado en el capítulo 4 el control se lo realiza con dispositivos digitales, que en el caso del controlador de voltaje es un equipo de la marca Basler Electric, modelo DECS – 200, el cual cumple las características de la Tabla No. 44.

Tabla 44. Características generales del dispositivo Basler Electric

Dispositivo:	Sistema de control digital de excitación
Marca:	Basler Electric
Model Number:	DECS – 200
Estilo:	102 – 2C
Número de serie:	H01234641
Puertos de Comunicación:	RS232 RS485
Señales de entrada y salida:	Entradas de detección AC Entradas auxiliares DC Salidas de campo AC, DC Salidas de Relé
Software:	Basler Electric BESTCOMS software versión 1.03.02

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

6.2.1 INSTALACIÓN DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE

Conexiones

Las terminaciones para las conexiones del DECS – 200 son localizadas en la sección derecha, frontal e izquierda del panel, se las ha dividido en estas secciones para definir cada una de las conexiones de acuerdo a su localización.

CAPÍTULO 6.

Sección Derecha

Esta sección contiene 18 pines (9 pines macho y 9 pines hembra), mismos que son utilizados para la comunicación en el caso de que se requiera operación en modo redundante es decir, comunicación con un segundo DECS – 200.

En el caso de la aplicación que se realiza en la unidad de generación No. 4, esta sección no se utiliza.

Sección Frontal

Esta sección contiene nueve pines, para la comunicación RS – 232 con un ordenador para la operación del software de configuración BESTCOMS.

Sección Izquierda

Esta sección contiene los terminales de conexión ubicados como se muestra en la Figura No. 91.

Definición de señales y materiales para la instalación

Las funciones de las terminales del DECS – 200 se describen de la siguiente manera:

Control de Alimentación

El DECS – 200 consta de dos juegos de terminales para su alimentación una para alimentación DC y la otra para alimentación AC

CAPÍTULO 6.

En el caso de la tensión nominal DC es de 125 Vdc y para el caso de la tensión nominal AC el DECS – 200 acepta 120 Vac. Estas terminales se las muestra en la Tabla No. 45.

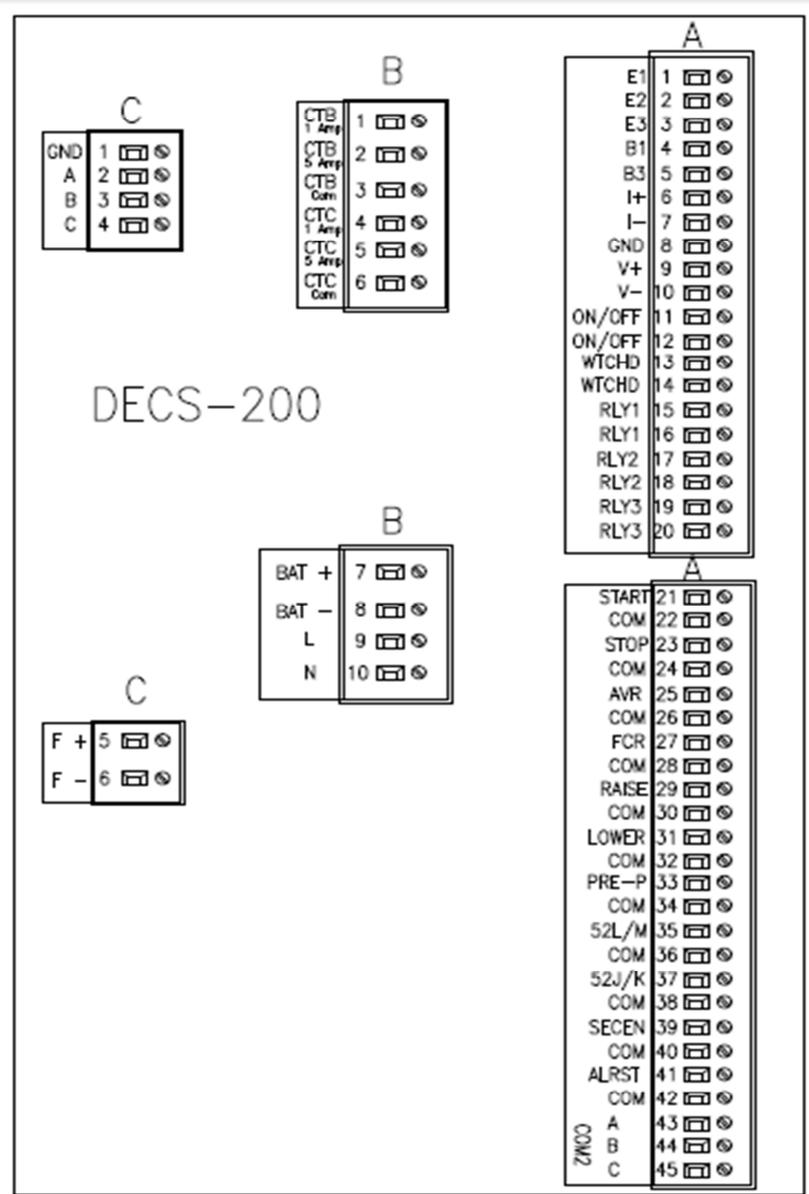


Figura 91. Terminales de la sección Izquierda del Panel del DECS - 200

Tabla 45. Terminales de la alimentación del DECS – 200

Terminal	Descripción
B7 (BAT +)	Entrada DC positiva
B8 (BAT -)	Entrada DC negativa
B9 (L)	Entrada AC, Línea
B10 (N)	Entrada AC, Neutro

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Potencia de Operación

La potencia de operación para el ancho de pulso modulado o PWM generalmente es derivada de la salida del generador

Esta potencia de operación puede ser de tres o una sola fase, además ésta debe tener la magnitud suficiente para soportar el nivel requerido de tensión de excitación. Para tensiones de campo de 32 Vdc la potencia de operación debe estar en un rango de 56 a 70 Vac, para 63 Vdc rango de 100 a 139 Vac, Para 125 Vdc rango de 190 a 277 Vac, y el rango de la frecuencia debe ser de 50 a 500 Hz.

Las terminales usadas para la potencia de operación se las muestra en la Tabla No. 47.

Tierra del Chasis

El DECS – 200 consta de un terminal para la conexión a tierra, que se detalla en la Tabla No. 46.

Tabla 46. Terminal de conexión a tierra

Terminal	Descripción
C1 (GND)	Conexión a tierra del DECS - 200

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 47. Terminales de la potencia de operación

Terminal	Descripción
C2 (A)	A – Fase de la entrada de potencia de operación
C3 (B)	B – Fase de la entrada de potencia de operación
C4 (C)	C – Fase de la entrada de potencia de operación

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Detección de Voltaje del Bus y del Generador

El DECS – 200 detecta tres o una sola fase del generador con cuanto rangos automáticamente seleccionados; 120, 240, 400, o 600 Vac para sistemas de 60 Hz y 100, 200, 400, o 500 Vac para sistemas de 50 Hz.

La detección del bus de voltaje de igual manera tiene cuatro rangos automáticamente seleccionables de los mismos valores que los del generador

Las terminales de detección de voltaje del bus y del generador son las que se muestra en la Tabla No. 48.

Tabla 48. Terminales de detección del bus y del generador

Terminal	Descripción
A1 (E1)	A – Fase de la entrada de detección de voltaje del generador
A2 (E2)	B – Fase de la entrada de detección de voltaje del generador
A3 (E3)	C – Fase de la entrada de detección de voltaje del generador
A4 (B1)	A - Fase de la entrada de detección de voltaje del bus
15 (B3)	C - Fase de la entrada de detección de voltaje del bus

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Detección de Corriente del Generador

Se dispone de dos terminales de detección de corriente para transformadores de corrientes de 1 Aac o 5 Aac.

También se tiene una entrada para sensar contracorrientes (diferencial de reactivos) en un bucle de compensación. Dos o más generadores conectados en paralelo pueden operar en el modo de compensación contracorriente, Así como la entrada de detección de corriente se tiene una entrada de contracorriente con dos terminales para TCs de 1 Aac o 5Aac.

Los terminales para la detección de corriente se detallan en la Tabla No. 49.

Entrada de Accesorios

El DECS – 200 acepta señales analógicas de otros controladores para un control remoto del valor de referencia. Se dispone de dos tipos de entradas tanto para voltaje como para corriente con un rango de -10 Vdc a 10 Vdc y 4 mAdc a

CAPÍTULO 6.

20 mAdc respectivamente. Los terminales para la entrada de accesorios se detallan en la Tabla No. 50.

Tabla 49. Terminales de detección de Corriente del Generador

Terminal	Descripción
B1 (CTB 1 AMP)	B – Fase de la entrada de corriente del generador para detección de 1 Aac
B2 (CTB 5 AMP)	B – Fase de la entrada de corriente del generador para detección de 5 Aac
B3 (CTB COM)	B – terminal común de la fase de detección de corriente
B4 (CT CC 1A)	Entrada de contracorriente para detección de 1 Aac
B5 (CT CC 5A)	Entrada de contracorriente para detección de 5 Aac
B6 (CT CC COM)	Terminal Común de entrada contracorriente

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Tabla 50. Terminales para las entradas de accesorios

Terminal	Descripción
A6 (I +)	B – Fase de la entrada de corriente del generador para detección de 1 Aac
A7 (I -)	B – Fase de la entrada de corriente del generador para detección de 5 Aac
A8 (GND)	B – terminal común de la fase de detección de corriente
A9 (V +)	Entrada de contracorriente para detección de 1 Aac
A10 (V -)	Entrada de contracorriente para detección de 5 Aac

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Contactos de Entrada

El DECS – 200 dispone de 11 arreglos de contactos de entrada, cada uno de estos acepta contactos secos de un switch/relé o de salidas de un PLC y

CAPÍTULO 6.

acepta una tensión de 12 Vdc, y una corriente mínima de 5 mAdc. El detalle de los terminales se muestra en la Tabla No. 51.

Tabla 51. Terminales de los contactos de entrada del DECS – 200

Función	Terminal	Terminal Común	Tipo de Entrada
START	A21 (START)	A22 (COM)	Momentáneo
STOP	A23 (STOP)	A24 (COM)	Momentáneo
Activado Modo AVR	A25 (AUTO)	A26 (COM)	Momentáneo
Activado Modo FCR	A27 (FCR)	A28 (COM)	Momentáneo
Comando de Subida	A29 (RAISE)	A30 (COM)	Momentáneo
Comando de Bajada	A31 (LOWER)	A32 (COM)	Momentáneo
Valor de Pre –Posición	A33 (PRE-P)	A34 (COM)	Continuo
Unidad/Paralelo	A35 (52L/M)	A36 (COM)	Continuo
Activado VAR/PF	A37 (52J/K)	A38 (COM)	Continuo
Activado Secundario	A39 (SECEN)	A40 (COM)	Continuo
Reseteo de Alarma	A41 (ALRST)	A42 (COM)	Momentáneo

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Contactos de Salida

El DECS – 200 tiene dos arreglos de salidas de contacto y tres contactos de salida programable por usuario. Todas las salidas son NO a excepción de la salida del watchdog que es NC. Los terminales de las salidas se muestran en la Tabla No. 52.

Tabla 52. Terminales de los contactos de salida del DECS – 200

Terminal	Descripción
A11 (ON/OFF)	Terminales de Contacto de salida ON/OFF
A12 (ON/OFF)	
A13 (WTCHD)	Terminales de contacto de salida de watchdog (NC)
A14 (WTCHD)	
A15 (RLY1)	Terminal de relé programable No. 1
A16 (RLY1)	
A17 (RLY2)	Terminal de relé programable No. 2
A18 (RLY2)	
A19 (RLY3)	Terminal de relé programable No. 3
A20 (RLY3)	

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Salida de Campo

La salida del DECS – 200 es capaz de suministrar 15 Adc de corriente de excitación continua a un campo con no menos de 2.13 ohmios de resistencia (a 32 Vdc), o 8.3 ohmios de resistencia (a 125Vdc). Los terminales se muestran en la Tabla No. 53.

Tabla 53. Terminales de la salida de Campo del DECS – 200

Terminal	Descripción
C5 (F +)	Terminal positivo de la salida de campo
C6 (F -)	Terminal negativo de la salida de campo

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Conexiones de la Comunicación

El puerto Com 2 es para la comunicación. Este puerto está destinado para una comunicación a través de la red Modbus. Es recomendable utilizar cable de par trenzado para el Com 2. Los terminales de la conexión son los que se detallan en la Tabla No. 54.

Tabla 54. Terminales del puerto COM2

Terminal	Descripción
A43 (A)	RS-485 Terminal A de envió/recibido
A44 (B)	RS-485 Terminal B de envió/recibido
A45 (C)	RS-485 Terminal tierra

Fuente: (BASLER ELECTRIC, 2011)
Elaborado por: Autores del proyecto

Señales para la instalación

En el caso del A.V.R de la central termoeléctrica Guangopolo las señales para la instalación son las anteriormente mencionadas en las funciones, sin embargo, se emite el uso de ciertas terminales como;

- Alimentación AC, debido a que se puede utilizar solamente la alimentación DC
- Reseteo de Alarma, debido a que ésta se la puede programar con el software
- Detección Contracorrientes, debido a que éste se utiliza para compensación de reactivos cuando se encuentran varios generadores conectados en paralelo
- El puerto de comunicación Com 2, debido a que se utiliza la comunicación RS-232, con un conversor adicional a Ethernet

La implementación del sistema de control de voltaje se la llevo a cabo en la puerta del antiguo A.V.R por petición de la empresa y ahorro de espacio, el lado frontal del regulador de voltaje instalado se puede observar en la Fotografía No. 9., y en la Fotografía No. 10. el lado posterior y además se encuentra los interruptores termomagnéticos, los relés y todos los elementos utilizados para que el sistema de control de voltaje funcione de manera adecuada.

Los planos de la instalación del sistema controlador de voltaje se encuentran en el Anexo 7. PLANOS ELÉCTRICOS Y DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE IMPLEMENTADO. Los materiales utilizados en la instalación se detallan en el Anexo 3. LISTA DE MATERIALES PARA LA INSTALACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD Y DE VOLTAJE.



Fotografía 9. Dispositivo DECS - 200 instalado en la sala de máquinas de la C.T. Guangopolo

6.2.2 CONFIGURACIÓN DE EQUIPOS

El software utilizado para la configuración de equipos es BESTCOMS, que es una aplicación basada en Windows con un ambiente amigable para la programación y supervisión del DECS – 200, (Basler Electric, 2011). El instalador del software viene incluido con el dispositivo digital, que contiene el manual de instalación y uso.



Fotografía 10. Sistema de Control de Voltaje instalado en la sala de máquinas de la C.T. Guangopolo

Una vez instalado el software se procede a realizar la comunicación con el dispositivo. Debido a que el dispositivo se encuentra en la sala de máquinas y se desea comunicar con la sala de control se conecta con un dispositivo conversor rs232 – Ethernet, de marca Lantronix. Se inicia la comunicación en la ventana principal del software, dando clic en la pestaña *Comunicaciones*>>*Open Comm Port*>>*Front Port – RS-232*, como se observa en la Figura No. 92.

CAPÍTULO 6.

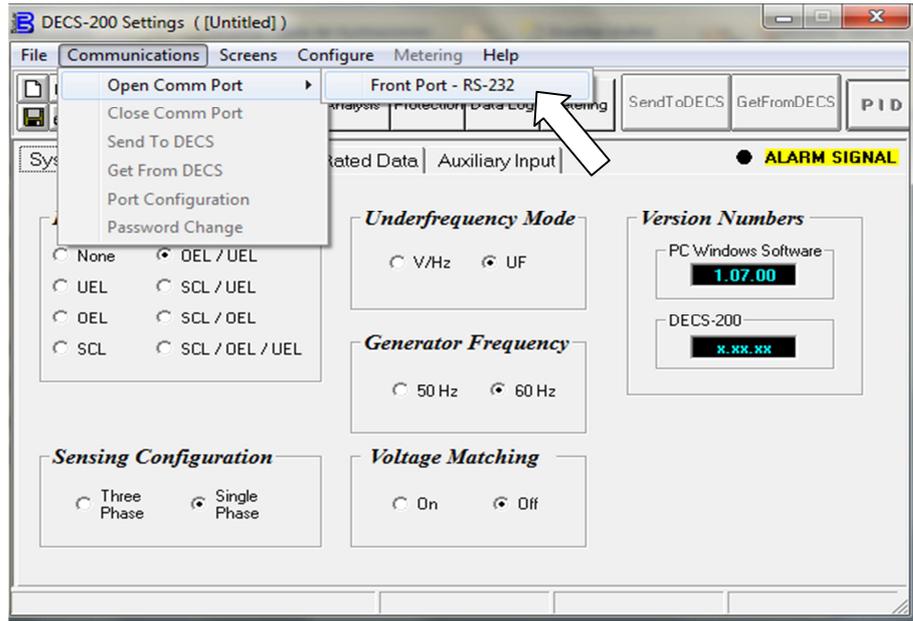


Figura 92. Iniciar comunicación con DECS – 200

Aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura No. 93. en la que se debe seleccionar el puerto en el que se conectó el dispositivo a la PC, posteriormente se dará clic en *Initialize*.

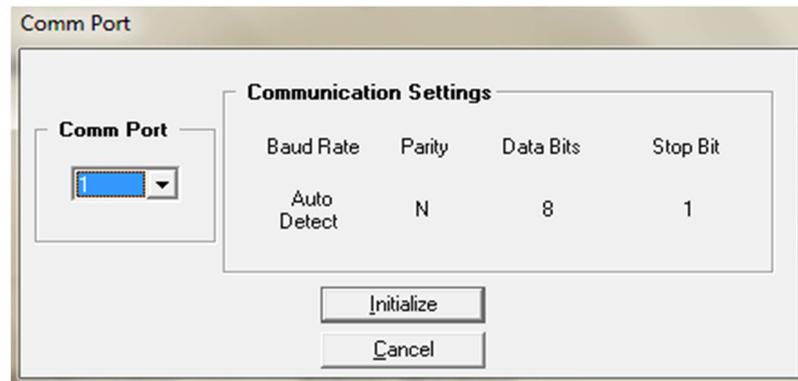


Figura 93. Escoger el Puerto de Comunicación conectado al DECS - 200

Una vez que se ha comunicado con el dispositivo, se procede a ingresar los datos de los parámetros generales del generador, en la pantalla de datos del sistema del Bestcoms, que se muestra en la Figura No. 94., dichas características se enlistan en la tabla No. 55.

CAPÍTULO 6.

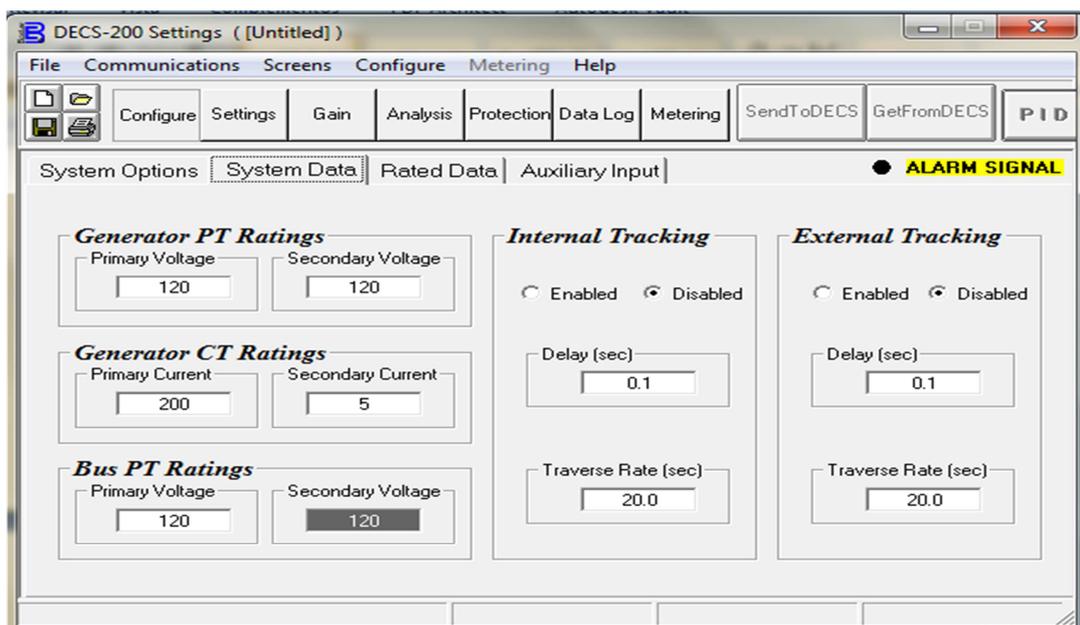


Figura 94. Datos del Sistema del generador en el software Bestcoms

Tabla 55. Características generales del generador UG4, para el software Bestcoms

Generator PT Primary Voltage	6600 Vac
Generator PT Secondary Voltage	110 Vac
Generator CT Primary Current	750 Aac
Generator CT Secondary Current	5 Aac
Bus PT Primary Voltage	6600 Vac
Bus PT Secondary Voltage	110 Vac
Generator Rated Apparent Power	7505,32 KVA
Generator Rated Power Factor	0,80
Generator Rated Real Power	5000 KW
Generator Rated Voltage	6600 Vac
Generator Rated Current	569 Aac
Generator Rated Field Voltage	105
Generator Rated Field Current	8.25
Pole Ratio = Exciter Poles/Generator Poles	1.125

Fuente: (Central Termoeléctrica Guangopolo, 2013)
Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 6.

La configuración de modos de funcionamiento, valores de medida, ajuste de valores del PID, protecciones y relés se realiza en base a los siguientes requerimientos:

- El dispositivo debe funcionar en modo AVR (relación automático de voltaje), a menos que el operador seleccione lo contrario desde la sala de control, de ser así se dispone de dos selectores; el primero para modo manual y automático y el segundo para control de reactivos.
- Se dispone de un selector para bajar o subir el voltaje, es decir ajustar la regulación a valores deseados por el operador.
- Se debe ajustar el valor de referencia de voltaje al que se mantiene en modo automático a 6600 V (valor de campo).
- Se debe ajustar los límites de sobreexcitación y bajaexcitación para el modo AVR

Los parámetros PID configurados en el dispositivo Woodward 2301D se encuentran en la Tabla No. 56.

Tabla 56. Parámetros configurados en la implementación del dispositivo Woodward 2301D

	Voltaje	Potencia Reactiva
Kp	120	55
Ki [1/seg.]	173	1
Td [seg.]	0.08	-

Elaborado por: Autores del proyecto

6.2.3 INTERFAZ HUMANO MÁQUINA (HMI) PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE

El diseño del HMI se realizó en base a la guía GEDIS, la cual se detalla en la Tabla No. 39.

CAPÍTULO 6.

El HMI se realizará de la misma manera que el del sistema de control de velocidad, ya que este complementa la pantalla utilizada para el mismo.

Distribución

En esta ventana se excluirá componentes tales como el título, el logotipo de la empresa, la hora y la fecha, debido a que estos ya se encuentran incluidos en la interfaz ya existente.

Entonces la plantilla de la ventana quedaría de la manera que se muestra en la Figura No. 95.

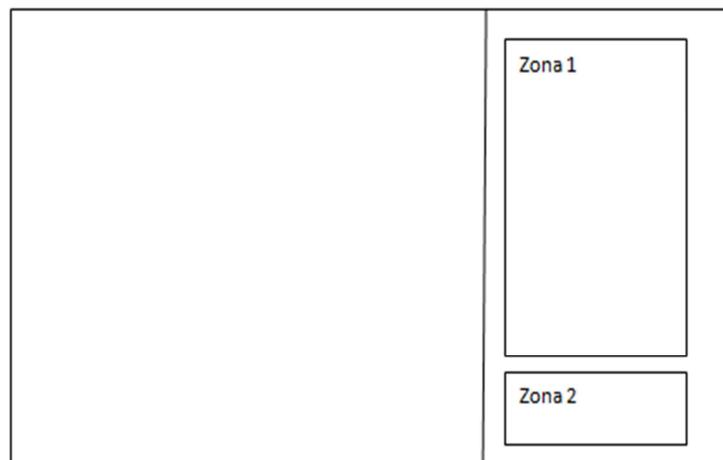


Figura 95. Plantilla de la ventana de Control de Voltaje

Navegación

Para la navegación se utilizarán los elementos que se detallan en la Tabla No. 57.

CAPÍTULO 6.

Color

En esta sección se consideró los colores recomendados en la guía GEDIS, sin embargo se tomó en cuenta los colores estándares que se utilizan en la interfaz ya desarrollada, a partir de esto, los colores utilizados se muestran en la Tabla No. 41.

Texto

La información textual es el medio por el cual la información del proceso es presentada al usuario, en el caso de la ventana del diseño se utilizará texto.

La fuente y las características que se utilizará son las que se muestra en la Tabla No. 42.

Tabla 57. Navegación de la ventana de Control de Voltaje

Elemento	Descripción
Zona 1	Zona en la que se puede visualizar: <ul style="list-style-type: none"> • La lectura de voltaje, corriente del generador, voltaje, corriente de excitación • El estado de los indicadores de control tales como el indicador de encendido, modo de control y modo de operación
Zona 2	Botón para reseteo de alarmas

Elaborado por: Autores del proyecto

Estatus de Equipos y Eventos de Proceso

En esta sección se determina los símbolos que se van a utilizar en la pantalla. Ahora en la Tabla No. 43. se establecen los indicadores y botones que se utilizarán.

CAPÍTULO 6.

Valores

En esta sección se definen los datos útiles a ser mostrados para el operador, en este caso es necesario tener los valores reales del voltaje del generador, de la corriente del generador, del voltaje de excitación de la corriente de excitación. Además se indicará información del estado del proceso, como la que se observa en la siguiente lista:

- Estado del controlador, es decir, si el regulador de voltaje (DECS - 200) se encuentra encendido o no
- Estado del modo de operación; manual, automático
- Estado del modo de control; Modo AVR, Modo VAR

Finalmente la Interfaz Humano máquina se ve como se muestra en la Figura No. 96.

6.2.4 PUESTA EN MARCHA

Para la puesta en marcha se toma en consideración los siguientes puntos antes de poner en funcionamiento el sistema de control de voltaje completo:

- Verificación de conexiones:

Es importante verificar que las conexiones se encuentren correctamente realizadas, para ello antes de conectar la fuente de alimentación se debe verificar que efectivamente la tensión que entregue sea de 24 VDC, y que la polaridad sea correcta en todos los puntos de conexión, además es importante verificar que los cables se encuentren

CAPÍTULO 6.

asegurados y que no existan cortos en la conexión verificando continuidad en todos los puntos de conexión.

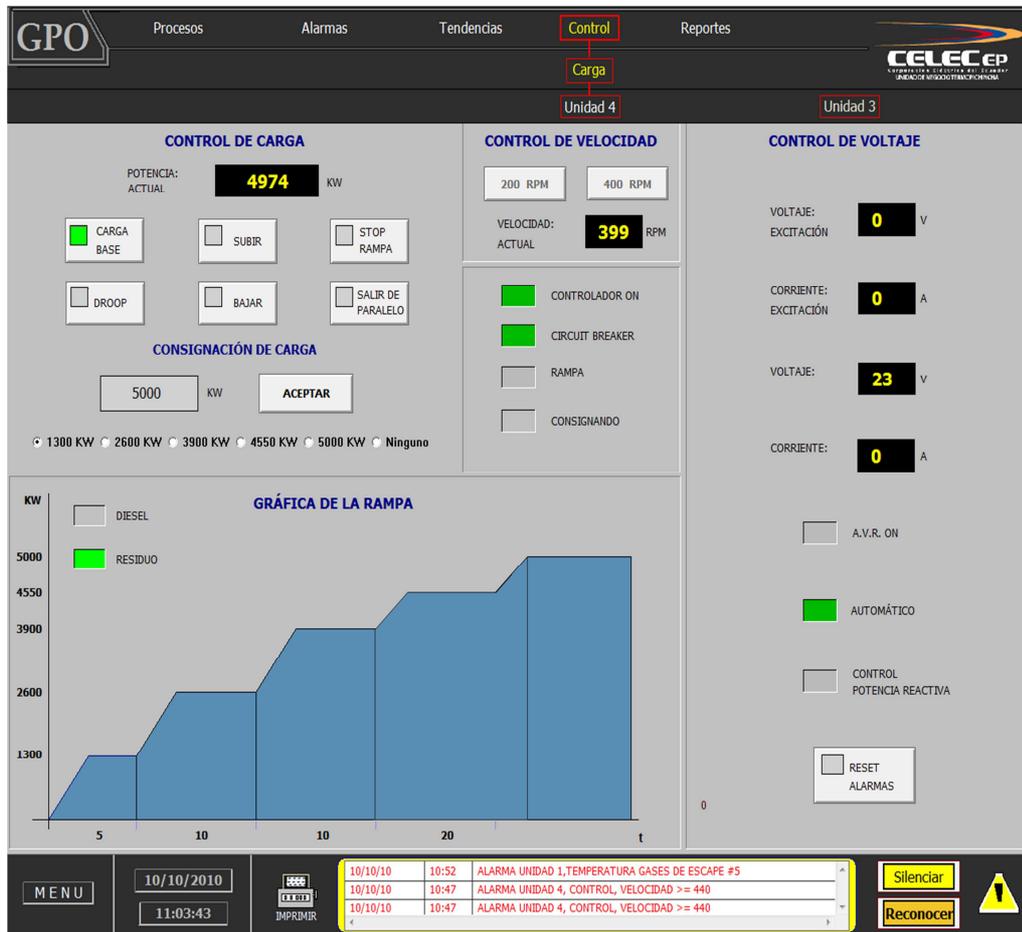


Figura 96. Interfaz Humano Máquina del Regulador de Velocidad y Voltaje de la UG4

- Verificación de la lógica del programa del HMI

Se debe verificar que las señales lleguen correctamente desde el HMI al dispositivo y que todas las señales enviadas del panel de control cumplan las condiciones eléctricas, tanto entradas y salidas analógicas como de relé.

CAPÍTULO 6.

- Puesta en marcha

Para la puesta en marcha del regulador de voltaje se realizaron una serie de pruebas para demostrar su correcto funcionamiento antes de que el controlador digital opere en forma permanente, estas pruebas se detallan en el capítulo 7, los datos de configuración obtenidos de las características nominales del fabricante según las características detalladas en la tabla 6.22 y del diseño previamente realizado en el capítulo 4 se asignan en el programa de comunicación con el DECS – 200 (BESTCOMS FOR DECS - 200, sin embargo estos parámetros por condiciones mecánicas del generador no operan a valores nominales, es por esto que las pruebas son de gran ayuda para reajustar dichos parámetros optimizando la operación y funcionamiento de la unidad. Una vez realizados los ajustes mencionados la configuración definitiva a la que se encuentra funcionando el sistema de excitación DECS – 200 se encuentra detallado en el ANEXO 2. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE.

CAPÍTULO 7.

PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 PRUEBAS

Una vez que se ha realizado la implementación de los reguladores de velocidad y de voltaje es importante asegurar que los sistemas funcionan correctamente en diferentes condiciones y para periodos indefinidos de generación, para ello se realizaron pruebas de funcionamiento que permitan verificar la respuesta de los controladores frente a diferentes eventos.

7.1.1 PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE VELOCIDAD

7.1.1.1 Pruebas en el sensor de detección de velocidad

La detección de la velocidad en el sistema de control de velocidad se la realiza por medio del sensor MPU, el cual entrega una señal de tensión al controlador de 1 – 30 VAC. Debido a que el sensor se encuentra directamente conectado al controlador se comprueba por medio del software de configuración Watch Window de Woodward que se entregue la señal al controlador y que éste

CAPÍTULO 7.

lo lea adecuadamente, para ello se verifica que el valor de lectura de velocidad en el menú *Service A*, muestre el valor actual convertido a RPM, esto se lo realiza en el arranque de la unidad generadora.

7.1.1.2 Pruebas de la Interface HMI

El HMI proporciona al operador un entorno amigable en el cual puede realizar cambios de carga, de modo de operación y visualizar el estado de los sistemas. Para comprobar que este funciona de manera adecuada se realizó pruebas de desempeño y de comunicación para que las variables que se leen y escriben desde el HMI estén en concordancia con los dispositivos implementados y que además tengan una respuesta adecuada en tiempo. También se supervisó la aceptación y la facilidad con la que los operadores lo utilizaban durante algunos días para comprobar que se mejoró y facilitó la operación de la UG4 de la C.T. Guangopolo.

7.1.1.3 Pruebas del Controlador Lógico Programable (PLC)

El PLC es un dispositivo que permite la optimización de ciertas tareas que en el caso utilizado ayuda al regulador de velocidad a realizar las rampas de carga automáticamente, a cambiar los modos de operación, además es el dispositivo que se comunica con el HMI. Para verificar su correcto desempeño antes de las pruebas generales se comprobó que las señales utilizadas en el programa sean las correctas tanto las de entrada como las de salida, también se verificó que los niveles de corriente y de voltaje sean los apropiados según su utilidad.

7.1.1.4 Pruebas Globales

Una vez que se realizaron las pruebas individuales se pone en funcionamiento todo el sistema y se somete a varias condiciones para comprobar la reacción que tiene frente a ellas, estas condiciones son eventos como;

- En el arranque y antes de que la unidad ingrese al paralelo. Por medio del botón de cambio de velocidad de 200 a 400 rpm del HMI, cambiar la velocidad y comprobar su respuesta.
- Una vez que la máquina a ingresado al paralelo y ha realizado la rampa de arranque, realizar cambios de consigna en el HMI, para comprobar la respuesta del controlador
- Realizar la salida del paralelo de la máquina mediante el botón ubicado en el HMI y dar clic en el botón de *Stop Rampa*, comprobar que la carga se estabiliza en el punto en el que se quedó, y volver a dar consignas.

Además de las pruebas mencionadas, en el Anexo 4. PROTOCOLO DE PRUEBAS EN SITIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE se puede observar el procedimiento que es un documento en el que se registran las pruebas realizadas con mayor detalle y con la revisión del supervisor de área.

7.1.2 PRUEBAS DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE

El regulador de voltaje requiere de varias pruebas tanto de conexión como de funcionamiento para que su desempeño sea el adecuado

CAPÍTULO 7.

7.1.2.1 Pruebas de la Interface HMI

El HMI proporciona al operador un entorno amigable en el cual puede supervisar los valores de corrientes y voltajes de generación además de la lectura del valor de la potencia reactiva, visualizar el estado del modo de operación y control y resetear alarmas si es que se presentaran. Para comprobar que este funciona de manera adecuada se realizó pruebas de desempeño y de comunicación para que las variables que se leen desde el HMI estén en concordancia con el dispositivo implementado. También se supervisó la aceptación y la facilidad con la que los operadores lo utilizaban durante algunos días para comprobar que se mejoró y facilitó la operación del nuevo regulador de voltaje de la UG4 de la C.T. Guangopolo.

7.1.2.2 Pruebas Globales

Se comprueba el desempeño global del sistema en vacío, para ello antes de poner en marcha el dispositivo se debe comprobar que los circuitos auxiliares tengan un correcto funcionamiento. Se debe entonces probar que los circuitos auxiliares se encuentren funcionando de una manera adecuada;

- La secuencia de encendido y apagado del sistema.
- Los modos de operación.
- Los indicadores de estado del sistema.
- Encendido de opciones tanto del HMI como dispositivos instalados en el panel de control de la UG4.
- Comprobar funcionamiento del dispositivo en casos de emergencia.

Además de las pruebas mencionadas, en el Anexo 4. PROTOCOLO DE PRUEBAS EN SITIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE se puede observar el procedimiento que es un documento en el que

CAPÍTULO 7.

se registran las pruebas realizadas con mayor detalle y con la revisión del supervisor de área.

7.2 RESULTADOS

7.2.1 Resultados de Operación

La operación de las unidades de generación requería de una constante supervisión debido a que el arranque de la máquina y los cambios de consigna de carga se los realizaba de manera manual y los operadores debían estar en constante vigilancia para cumplir con las condiciones y tiempos que las máquinas requieren tanto para el arranque, el ingreso al paralelo, la salida de paralelo, etc. Los resultados que se presentó con la implementación de los nuevos reguladores debido a que son automáticos hacen que la supervisión se reduzca a una supervisión de registro en caso de fallas y paradas de unidad y cambios de consigna cuando estas sean requeridas.

El manual de operación de los sistemas de control implementados se encuentra en el Anexo 5. MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD Y VOLTAJE, mismo que fue entregado a los operadores de la sala de control de la C.T. Guangopolo, después de que se les impartió una capacitación de la operación de los nuevos sistemas implementados.

7.2.2 Resultados del Sistema de Control de Velocidad

El regulador de velocidad implementado se ha acoplado al funcionamiento de una manera adecuada a lo largo de las pruebas que se han realizado en la C.T. Guangopolo en un periodo de alrededor de 2 meses con cambios

CAPÍTULO 7.

evolutivos de acuerdo al desarrollo de este proyecto, garantizando el correcto funcionamiento a largo plazo en la UG4.

La UG4 de la CT. Guangopolo así como las demás unidades de generación presentaban oscilaciones de velocidad y carga hasta llegar a su referencia, sin embargo en la UG4 con el regulador instalado se ha conseguido mejoras significativas en el control tanto de las oscilaciones presentadas como del tiempo de respuesta y picos máximos.

7.2.3 Resultados del Sistema de Control de Voltaje

El regulador de tensión instalado ha permitido que la variación de generación de voltaje disminuya de manera notable, presentando estabilidad en las mediciones analógicas y digitales del sistema, ya que la variación presentada es mínima, permitiendo de esta manera que la producción de energía sea de mayor calidad y oportuna de acuerdo a la demanda. Además el sistema tiene una respuesta adecuada frente a fallas que se puedan presentar con reacciones oportunas evitando el daño de la unidad generadora y alargando la vida útil de la misma.

El control del sistema de voltaje ha mejorado de manera aceptable en la unidad generadora, presentando un rendimiento estable en la sincronización y presentando estabilidad en las mediciones de voltajes, corrientes y potencia reactiva del generador.

7.2.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

Para realizar el análisis de los resultados que se obtuvieron en la simulación se observa las gráficas del capítulo 5. Figuras No. 54. y No. 55. para el sistema de velocidad y Figuras No. 59. y No. 60 para el sistema de voltaje,

CAPÍTULO 7.

mismas que se muestran en la Figuras de análisis No. 97., y No. 98., para el sistema de Velocidad y Figuras de análisis No. 99., y No. 100., para el sistema de Voltaje en las que se puede observar que el objetivo perseguido se ha alcanzado en un porcentaje considerable, tomando en cuenta que el objetivo buscado tanto en el sistema de control de velocidad como de voltaje era estabilizar la respuesta, es decir, obtener un mínimo de variaciones en las señales correspondientes a velocidad y voltaje para tener una generación estable y continua. En la Tabla No. 58., se observa el porcentaje alcanzado según los pasos seguidos en el diseño del capítulo 4.

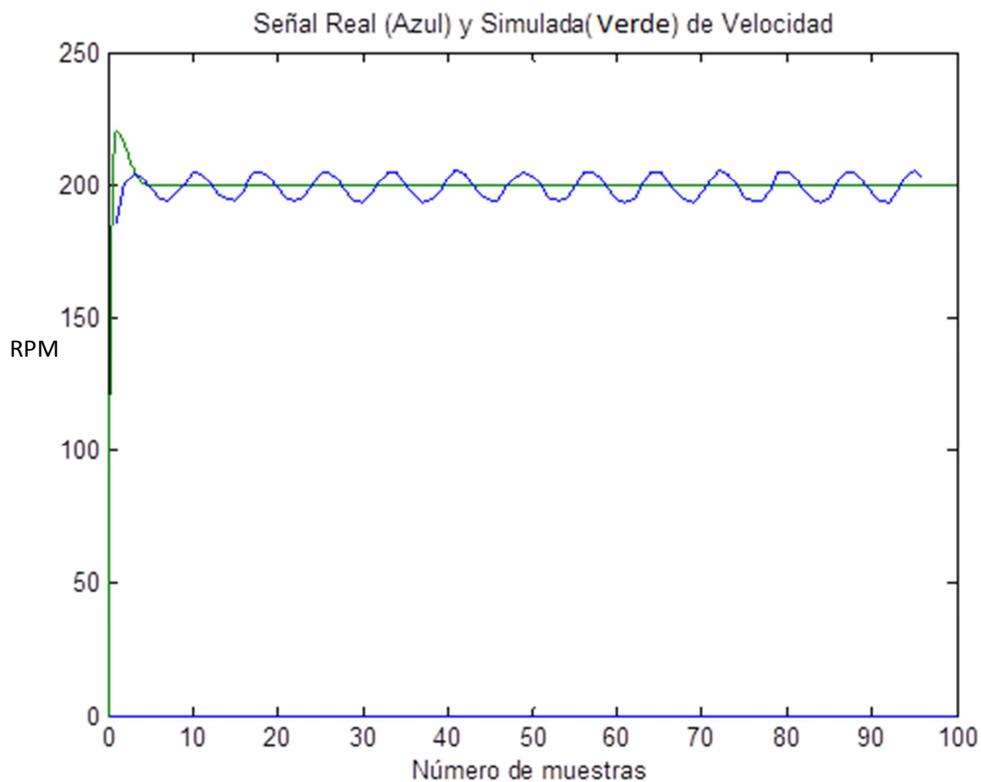


Figura 97. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de velocidad (0 a 200 rpm)

CAPÍTULO 7.

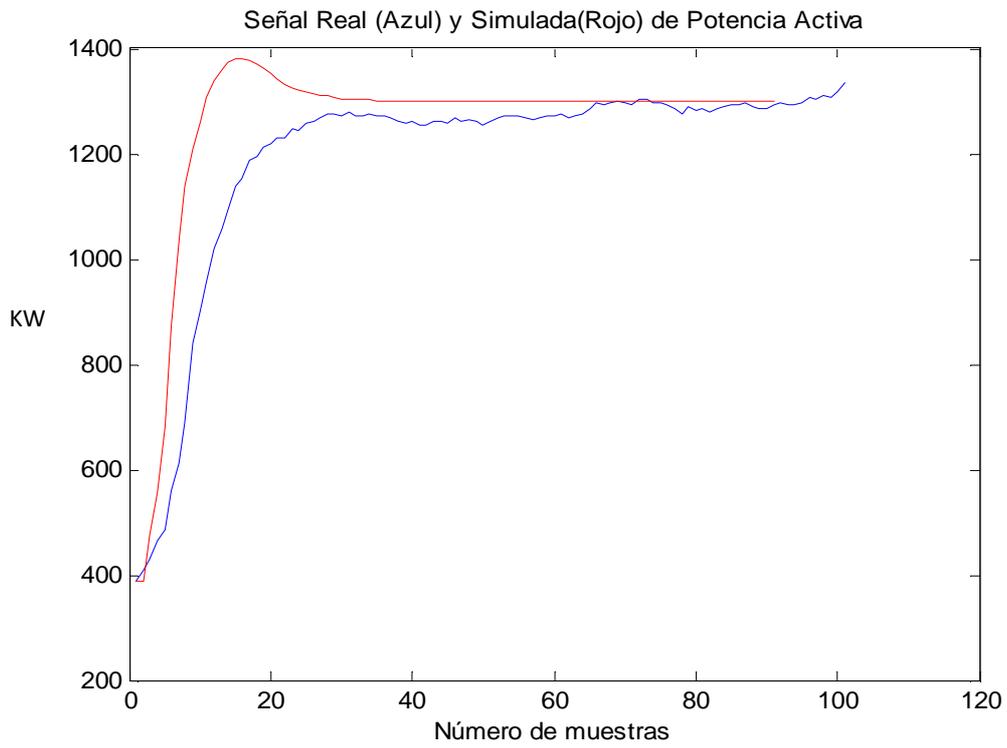


Figura 98. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de Potencia Activa (300 a 1300 KW)

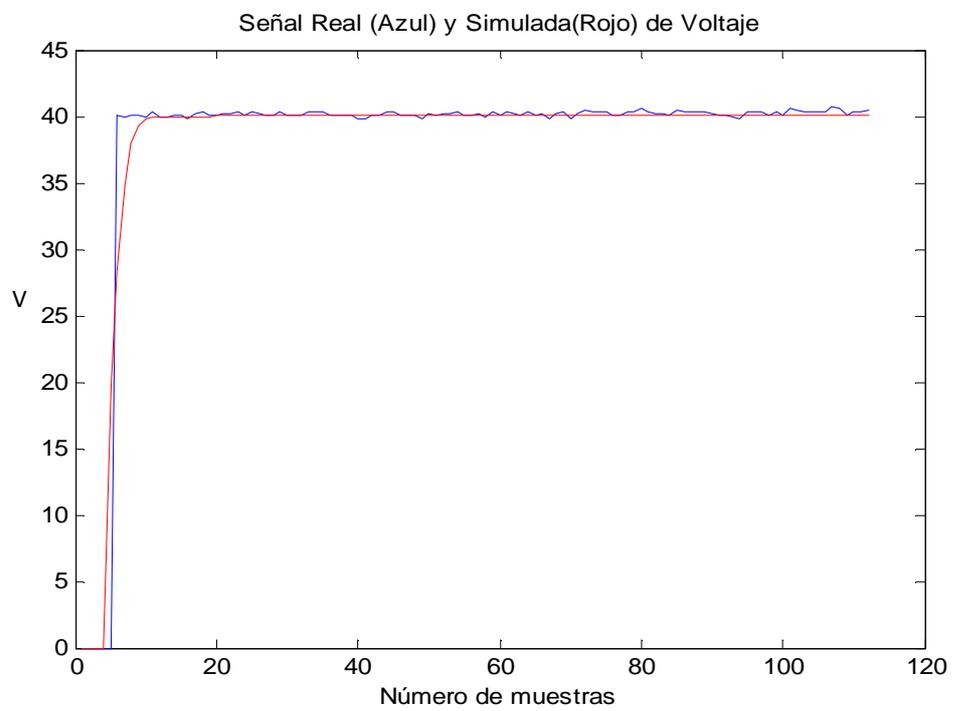


Figura 99. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de Voltaje (0 a 40 V)

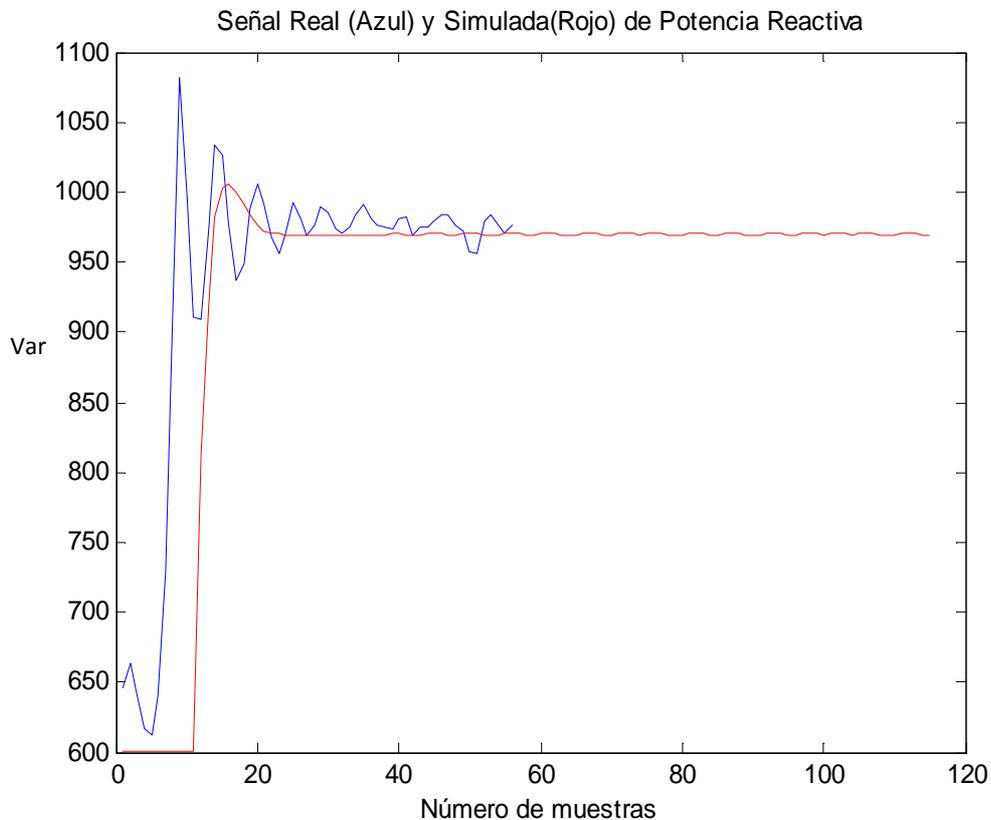


Figura 100. Gráfica análisis de señal real y señal simulada de la rampa de Potencia Reactiva (600 a 970 Var)

En la Tabla No. 58., se puede observar que los logros alcanzados en la simulación corresponden a valores que no alcanzan el 100% en todos los casos, esto es debido a condiciones de obtención de parámetros de identificación por pérdidas de datos, software de obtención de parámetros por tiempos de muestreo, software de simulación por mínima precisión, sin embargo por el tipo de sistema y al ser una identificación off-line se consideran porcentajes aceptables para saber el desempeño y comportamiento del sistema en la simulación.

Tabla 58. Valores en porcentaje alcanzado de acuerdo al objetivo establecido en la UG4

Objetivo	Porcentaje Alcanzado	
Sistema de Control de Velocidad		
	Velocidad	Potencia Activa
Identificación de la planta	81.78%	88.86%
Modelo Matemático	81.78%	88.86%
Parámetros del Controlador	95%	70%
Variaciones de Velocidad	0%	-
Variaciones de Carga	-	0%
Tiempo de Respuesta	+69%	35%
Sistema de Control de Voltaje		
	Voltaje	Potencia Reactiva
Identificación de la planta	77.49%	85.92%
Modelo Matemático	77.49%	85.92%
Parámetros del Controlador	95%	100%
Variaciones de Tensión	0%	-
Variaciones de Corriente	-	0.6%
Tiempo de Respuesta	1%	45%

Elaborado por: Autores del proyecto

Los valores de los porcentajes alcanzados en la identificación de la planta que se observa en la Tabla No 58. son tomados de la identificación realizada en Matlab en el capítulo 4 y para los porcentajes del modelo matemático y parámetros del controlador se comparó la gráfica real con la gráfica simulada de las correspondientes señales.

Los valores a los que se hace referencia para obtener los porcentajes de variaciones son los valores de consigna, es decir 400 rpm, 5000 KW, 24 V (primera rampa de voltaje) y 200 Var, para velocidad, potencia activa, voltaje y

CAPÍTULO 7.

potencia reactiva respectivamente y para los tiempos de respuesta la referencia es 2 segundos.

7.2.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA IMPLEMENTACIÓN

El resultado de la implementación se obtiene de la lectura de las curvas de respuesta obtenidas del sistema de supervisión de la sala de control, expuestas en las gráficas de la Figura No. 101. y No 102, para el sistema de velocidad y Figura No. 103. y No. 104, para el sistema de voltaje, en las que se puede observar que el objetivo perseguido se ha alcanzado en un porcentaje considerable, tomando en cuenta que el objetivo buscado tanto en el sistema de control de velocidad como de voltaje era estabilizar la respuesta, es decir, obtener un mínimo de variaciones en las señales correspondientes a velocidad y voltaje para tener una generación estable y continua. En la Tabla No. 59., se observa el porcentaje alcanzado según los pasos seguidos en el diseño del capítulo 4. y 5.

En la Figura No. 101 se observa la rampa de arranque de velocidad de la UG4, en la que el tiempo programado para el cambio de 200 a 400 rpm es de 5 minutos, es por eso que la señal implementada representada por el color azul tarda en alcanzar 400 rpm, sin embargo el tiempo de establecimiento es de 1 segundo.

CAPÍTULO 7.

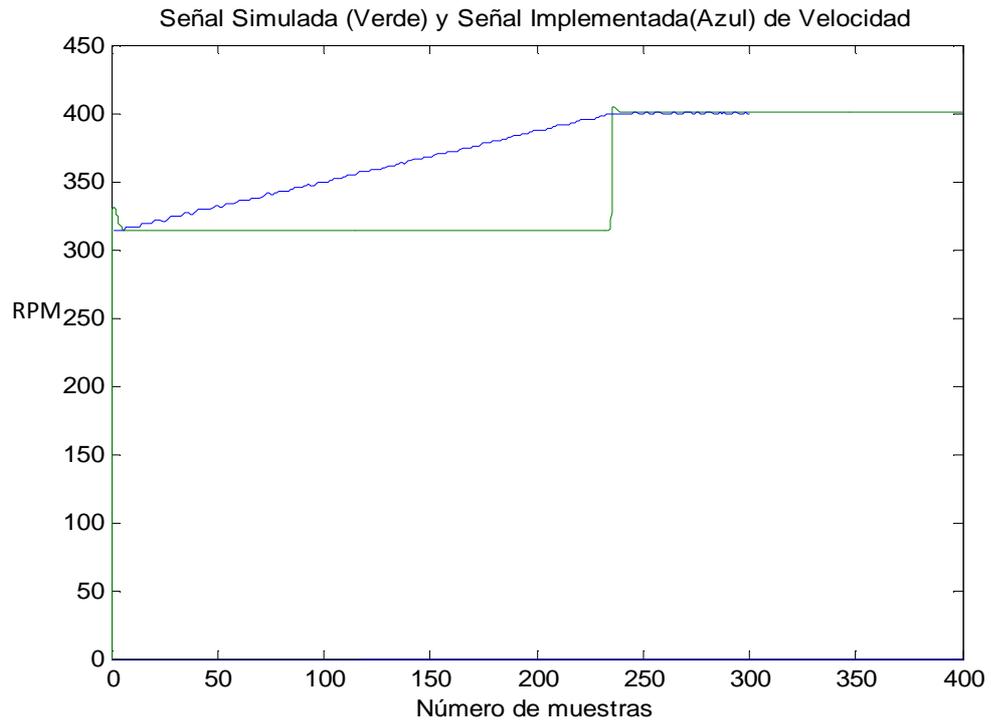


Figura 101. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de la rampa de Velocidad (de 200 a 400 rpm)

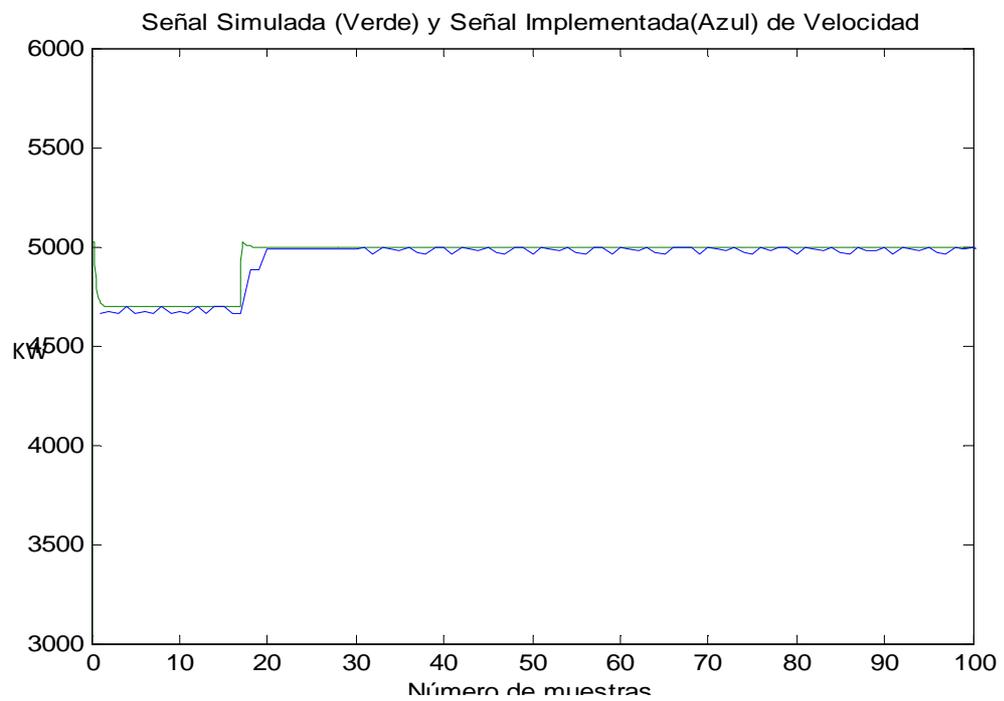


Figura 102. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de Potencia Activa (de 4700 a 5000 KW)

CAPÍTULO 7.

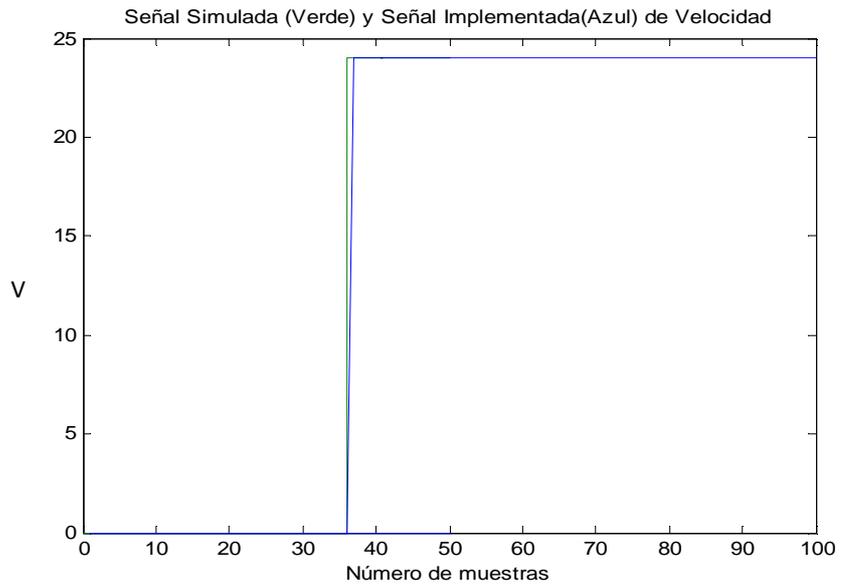


Figura 103. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de Voltaje (de 0 a 24 V)

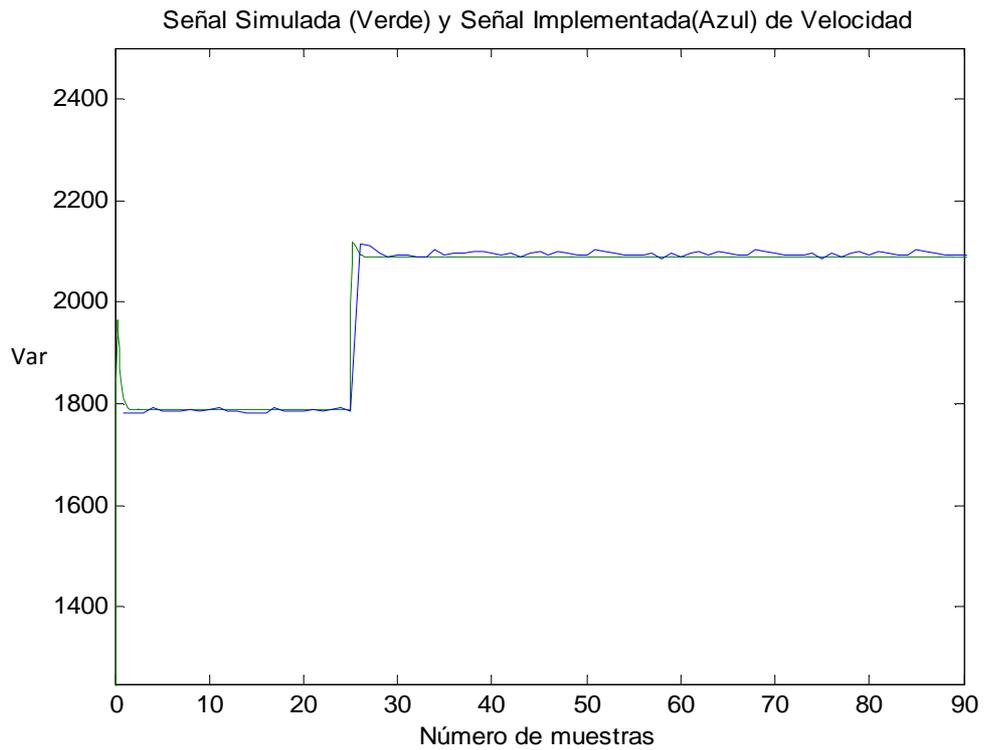


Figura 104. Gráfica análisis de señal real implementada y señal simulada de Potencia Reactiva (de 1780 a 2090 KVar)

CAPÍTULO 7.

En la Tabla No. 59., se puede observar que los logros alcanzados en la implementación corresponden a valores que no alcanzan el 100% en todos los aspectos y comparando con los valores alcanzados en la simulación estos son menores, esto es debido a los mismos inconvenientes presentados por la simulación debido a las condiciones de diseño, sin embargo por el comportamiento real alcanzado en la UG4 se consideran porcentajes aceptables en los cuales la unidad generadora puede mantenerse en un adecuado funcionamiento y en largos periodos de generación como lo ha venido haciendo durante el desarrollo del presente proyecto sin presentar inconvenientes.

Tabla 59. Valores en porcentaje alcanzado de acuerdo al objetivo establecido en la UG4

Objetivo	Porcentaje Alcanzado	
Sistema de Control de Velocidad		
	Velocidad	Potencia Activa
Identificación de la planta	81.78%	88.86%
Modelo Matemático	81.78%	88.86%
Parámetros del Controlador	95%	98%
Variaciones de Velocidad	0.25%	-
Variaciones de Carga	-	0.78%
Tiempo de Respuesta	50%	+50%
Sistema de Control de Voltaje		
	Voltaje	Potencia Reactiva
Identificación de la planta	77.49%	85.92%
Modelo Matemático	77.49%	85.92%
Parámetros del Controlador	90%	100%
Variaciones de Tensión	0.32%	-
Variaciones de Potencia Reactiva	-	1.15%
Tiempo de Respuesta	50%	+50%

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 7.

Los valores de los porcentajes alcanzados en la identificación de la planta que se observa en la Tabla No 59. son tomados de la identificación realizada en Matlab en el capítulo 4 y para los porcentajes del modelo matemático y parámetros del controlador se comparó la gráfica real antes de la implementación con la gráfica real después de la implementación de las correspondientes señales.

Los valores a los que se hace referencia para obtener los porcentajes de variaciones son los valores de consigna, es decir 400 rpm, 5000 KW, 24 V (primera rampa de voltaje) y 200 Var, para velocidad, potencia activa, voltaje y potencia reactiva respectivamente y para los tiempos de respuesta la referencia es 2 segundos.

7.2.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO SIMULADO E IMPLEMENTADO

De acuerdo a las gráficas presentadas en la sección 7.2.4 y 7.2.5 se presenta en la Tabla No. 60. La comparación de los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la implementación.

En la Tabla No. 60., se puede observar que los valores de los parámetros PID estimados en la simulación no son exactamente los mismos que los valores utilizados en la implementación, ya que debido a la pérdida de datos en la identificación y el comportamiento real de los generadores se requirió realizar ajustes para que el control de velocidad y voltaje sea el adecuado y funcione de manera óptima en la C.T. Guangopolo, sin embargo el desarrollo del diseño fue la base fundamental para que actualmente la unidad generadora se encuentre funcionando en óptimas condiciones.

Tabla 60. Comparación de resultados, Simulación – Implementación

Objetivo	Porcentaje Alcanzado	
	Simulado	Implementado
Sistema de Control de Velocidad		
Oscilaciones de Velocidad	0%	0.25%
Oscilaciones de Carga	0%	0.78%
Tiempo de respuesta Velocidad	+69%	50%
Tiempo de respuesta Potencia Activa	35%	+50%
PID Velocidad		
Kp	20.62	20.21
Ti	0.9062	0.94
Td	0.2265	0.22
PID Potencia Activa		
Kp	40.68	40.66
Ti	0.625	0.64
Td	0.08	0.15
Sistema de Control de Voltaje		
	Simulado	Implementado
Oscilaciones de Voltaje	0%	0.32%
Oscilaciones de Potencia Reactiva	0.6%	1.15%
Tiempo de respuesta Velocidad	1%	50%
Tiempo de respuesta Potencia Activa	45%	+50%
PID Voltaje		
Kp	114	120
Ti	185	173
Td	0.15	0.08
PID Potencia Reactiva		
Kp	55	55
Ti	1	1

Elaborado por: Autores del proyecto

Los ajustes realizados no son tan alejados de los valores simulados y se desarrollaron en base a los parámetros obtenidos en el diseño, mismos que fueron acompañados de una serie de pruebas que se presenta en el Anexo 4. PROTOCOLO DE PRUEBAS EN SITIO PARA EL SISTEMA DE CONTROL DE

CAPÍTULO 7.

VELOCIDAD Y VOLTAJE, del actual proyecto y que permitió que los sistemas implementados en el periodo de duración de este proyecto presenten la respuesta buscada, garantizando de ésta manera el adecuado funcionamiento a largo plazo.

7.3 EVALUACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL IMPLEMENTADOS

En esta sección del presente proyecto se busca determinar las mejoras que produjeron los cambios generados en el sistema de control de la UG4, tomando en cuenta ventajas así como también posibles desventajas si es que las hubiere.

La base para la evaluación de la implementación de los sistemas de control es el funcionamiento en condiciones ideales de la unidad generadora, es decir, las características dadas por el fabricante (valores nominales), estas características para que la UG4 funcione al 100% se muestran en la Tabla No. 61.

Los aspectos que se consideran en los sistemas de control tanto de velocidad como de voltaje se evalúan antes de realizarse la implementación del proyecto y después de finalizarse el mismo, dichos aspectos con sus respectivos resultados se los puede observar en la Tabla No. 62., se considera porcentajes de evaluación en un rango de 0 – 100%. (Si el 100% son las condiciones ideales de funcionamiento del generador).

En base a los porcentajes observados en la Tabla No. 62., se puede determinar que los sistemas de control de velocidad y voltaje han tenido una mejora importante en la UG4, y un desempeño más adecuado, además estos

CAPÍTULO 7.

porcentajes determinan el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto, presentando condiciones de desempeño de la unidad generadora que además de mejorar el rendimiento, prevendrá daños a corto plazo y facilitará la supervisión y operación de la misma.

Tabla 61. Características Generales del fabricante de la UG4.

Valores Nominales		
Sistema de Control de Velocidad		
Velocidad	de	400 rpm
sincronismo		
Frecuencia	de	60 Hz
Sincronismo		
Potencia	Activa	5.1 MW (por condiciones mecánicas y desgaste se considera 5.0 MW)
Generada		
Potencia de Salida		6500 KVA
Sistema de Control de Voltaje		
Voltaje	de	84 V
Excitación		
Voltaje de Salida		6600 V
Corriente	de	422 A
Excitación		
Corriente		569 A

Elaborado por: Autores del proyecto

El objetivo del presente proyecto era determinar que los tiempos de establecimiento de los controladores sean menores que los tiempos de reacción ante una apertura del relé de distancia (relé en respuesta a fallas del SNI). Con los valores simulados y los obtenidos en pruebas realizadas a los controladores, se observa que los tiempos de respuesta son menores a los tiempos de

CAPÍTULO 7.

apertura de las condiciones de los relés de protección como se analizó en la última sección del capítulo 5, y se resume en la Tabla No. 63.

Tabla 62. Evaluación de resultados obtenidos en la UG4 de la C.T. Guangopolo

	Antes	Después
Sistema de Control de Velocidad		
Velocidad	399 – 402 rpm	400 - 401 rpm
Potencia	4900 -5010 kw	4980 – 5000 kw
Tiempo de establecimiento de velocidad	Designado por el operador	predeterminado en el dispositivo
Tiempo de consigna	Designado por el operador	predeterminado en el dispositivo
Supervisión	continua	Eventos especiales
Sistema de Control de Voltaje		
Voltaje de Excitación	39 – 41 V	40 V
Voltaje de Generador	6400 – 6700 V	6600 V
Potencia Reactiva (si la consigna es de 2000 Var)	1800 – 2100 Var	1991 – 2014 Var
Tiempo de establecimiento de Voltaje	Designado por el operador	1 seg.
Tiempo de establecimiento de Potencia Reactiva	Designado por el operador	5 seg.
Supervisión	continua	Eventos especiales

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 7.

Tabla 63. Evaluación de resultados obtenidos de los máximos picos y tiempos de establecimiento

Controlador	Máximo Pico [%]		Tiempo de establecimiento [s]	
	Simulado	Implementado	Simulado	Implementado
Velocidad	2.11	0	3.92	1
Voltaje	0.431	0	0.0191	1
Potencia	4.59	0	0.758	3
Activa				
Potencia	2.02	2.55	0.202	3
Reactiva				

Elaborado por: Autores del proyecto

CAPÍTULO 8.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- El desarrollo del presente proyecto incluyó cambios en el diseño original de los sistemas de control de velocidad y voltaje, dichos cambios aportan a la mejora del funcionamiento general y garantizan una demanda de energía estable sin alterar el proceso de generación de la Central Termoeléctrica Guangopolo.
- La identificación de los sistemas es un proceso importante, en el cual es indispensable tomar en consideración varias pautas para encontrar un modelo matemático adecuado para la aplicación; como la obtención, análisis y tratamiento de los datos de entrada y salida, y la elección de métodos de identificación.
- El método de identificación como parte del diseño usado en el presente proyecto permitió obtener un modelo de proceso con porcentajes de eficacia de aproximadamente 80 a 90% para el sistema de control de velocidad y voltaje en relación al proceso real, esto permite garantizar y establecer los parámetros del controlador para un correcto funcionamiento de los sistemas controlados.

CAPÍTULO 8.

- El modelo matemático del proceso y los controladores diseñados, permitieron establecer los tiempos de establecimiento y máximos picos con el propósito de garantizar que los tiempos de respuesta de los controladores sean menores a los tiempos de disparo de los relés de protección, éste mecanismo permite justificar la manera en la cual los sistemas instalados pueden reaccionar ante una falla del sistema nacional interconectado, tomando en consideración el tipo de falla y la forma en como esta ocurre según el análisis realizado en este proyecto.
- El comportamiento del Sistema de Control de Voltaje y Velocidad implementados presentan mejoras considerables durante su funcionamiento, operatividad y supervisión, como variaciones mínimas en el voltaje, velocidad, potencia activa y reactiva, manejo de consignas, lecturas en datos del HMI, entre otros, que demuestran la efectividad del diseño realizado.

8.2 RECOMENDACIONES

- Un sistema de generación de energía eléctrica conforma diferentes procesos y subprocesos para llevar a cabo su finalidad, es por ello que para entender de mejor manera el funcionamiento y comportamiento de una determinada etapa en la generación, se deben analizar dichos procesos y subprocesos con el fin de comprender los lazos de control que intervienen en los sistemas de control.
- Se recomienda implementar los sistemas de control de Velocidad y Voltaje en las demás unidades de generación de la C.T. Guangopolo para de ésta manera mejorar el funcionamiento de las mismas.
- La instalación de los reguladores de velocidad y voltaje requieren de circuitos auxiliares previamente diseñados, para los cuales se debe conseguir los materiales adecuados según su funcionalidad considerando

CAPÍTULO 8.

características técnicas y condiciones de seguridad, mismas que se encuentran detalladas en el presente proyecto.

- Para obtener un modelo matemático que ajuste con un mayor grado de precisión o que refleje de mejor manera el comportamiento de la planta en estudio, se recomienda utilizar tarjetas de adquisición de datos, debido a que éstas permiten ajustar el tiempo de muestreo y a través de este mecanismo evitar perder información del comportamiento dinámico del sistema.
- Se recomienda realizar una capacitación de la operación de los sistemas implementados tanto del interfaz humano máquina HMI como de los elementos instalados en el panel de control central y local, de preferencia una vez se haya instalado el sistema para prevenir fallos en la operación.
- Para realizar pruebas técnicas y verificar el comportamiento dinámico de los sistemas de control y evaluar su desempeño ante una falla simulada en S.N.I (apertura del interruptor de alcance), se recomienda establecer el modo de operación Droop en los dos controladores, este modo de operación permitirá realizar continuamente el control de velocidad (frecuencia) y voltaje, cuando la unidad de generación sea aislada del S.N.I y deba suministrar energía a los sistemas auxiliares.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUERO J. L., I. F. (2009). Ensayos de campo y determinación de modelos de motogeneradores. *Comité de estudio C6, Sistema de Distribución y generación Dispersa*, (págs. 1 - 8). Argentina.
- ALVAREZ. (2009). Máquina Síncrona. *Disponible en: http://www.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes_EyM/Capitulo_9_Maquina_Sincronica.pdf*.
- Basler Electric, B. (2011). *Instruction Manual for Digital Excitatio Control System DECS - 200*. Highland Illinois 62249, USA.
- BOLAÑOS MENA, R. (2012). Análisis de estabilidad transitoria del sistema de potencia de un generador contra barra infinita utilizando un regulador automático de tensión BASLER DECS - 200. *Proyecto Eléctro IE - 0502*, (págs. 20 - 44). Universidad de Costa Rica.
- Central Termoeléctrica Guangopolo*. (s.f.). Guangopolo: Central Termoeléctrica.
- EDUCA, E. (2012). Funcionamiento básico de generadores . *Los Generadores Eléctricos*.
- ESPIÑOZA, C. O. (2011). Sistema de agua de enfriamiento para centrales termoeléctricas. *ECUDOS S.A*, 6 - 15.
- FERNÁNDEZ DIEGO I., R. D. (2012). Centrales de generación de energía eléctrica. *Centrales Térmicas*, (pág. 116). Cantabria, España.
- GIJÓN. (2006). Simulación de sistemas de control continuos con Matlab y SIMULINK. *Ingeniería de sistemas y automática, Universidad de Oviedo*, (págs. 6 - 13). Oviedo, España.
- GRIJALVA AGUAS H., S. Y. (2005). Auditoría energética y análisis del impacto ambiental en dos motores de combustión interna marca Mitsubishi man v9v40/54 y sus respectivos equipos auxiliares que conforma el sistema de generación termoeléctrica de la central termoeléctrica Guangopolo. *Tesis de Ing. Mecánica, Escuela Politécnica del Ejército*, (págs. 10 - 31, 69 - 146). Quito, Ecuador.
- Guillén, M. E. (2002). *Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua*. Madrid, España: Universidad de Alcalá de Henares.
- IEEE 421.1, S. (1986 revisión 1972). IEEE Standard definitions for Excitation Systems for Synchronous machines. *IEEE - SA*, 7 - 19.
- IEEE 421.5, S. (2005). IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE -SA*, 14 - 15.

- Industriales, E. I. (2011). Centrales Eléctricas, el alternador. *Departamento de ingeniería eléctrica, electrónica y control, UNED LÓPEZ GUILLÉN M*, (págs. 1 - 33).
- Meidensha. (1970). Manual de Instrucciones para equipo electrico. En Meidensha, *Instrucciones para el manejo general de reles* (págs. Pag. 673-751). Guangopolo: Instrucciones para el manejo general de reles, pags.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control Moderna*. Pearson Prentice Hall: 4ta Edición.
- Prabha, K. (1994). *Power System Stability and Control*. Palo Alto, California: ISBN 0-07-035958-X.
- Proakis J., M. D. (1998). *Tratamiento digital de señales*. Pearson, Prentice Hall.
- Romero Centeno C., M. G. (2011). Análisis de factibilidad sobre lainyección de aceite quemado en combinación con bunker, como combustible alternativo, en el área del precalentador, en el proceso de clinkerización, en la empresa "Industrias Guapán". *Tesis de Ing. Industrial, Universidad Politécnica Salesiana*, (págs. 19 - 64). Quito, Ecuador.
- Salazar Monge, F. (2011). Elaboración de procesos para la implementación de un sistema de Gestión de mantenimiento para los motores MITSUBISHI modelo MAN V9V9 40/54, en la Central de generación termoeléctrica Guangopolo; de la corporación estatal (CELEC EP). *Tesis Ing. Mecánica*, (págs. 62 - 75). Quito, Ecuador.
- Sanchez Iñiguez D., T. S. (2007). Análisis de confiabilidad del sistema nacional interconectado Ecuatoriano utilizando el software Neplan. *Tesis de Ing. Eléctrico, Universidad Politécnica Nacional*, (págs. 113 - 179). Quito, Ecuador.
- Schneider Electric, S. (2008). *Manual Twido Suite*. España: Versión 2.1.
- Villegas Martinez, A. (2007). *Motores de Combustión Interna*. IES Baix Montseny, Saint Celoni: Treball de recerca.
- Weidmuller. (2011). *Hoja Técnica CPM SNT 120W 24V 5A*. Alemania.
- Woodward. (2003). *Governing Fundamentals and Power Managment*. Colorado, USA: Manual 26260.

GLOSARIO

A.V.R:	Regulador automático de Voltaje (Automatic Regulator Voltage)
Consigna:	Valor de carga establecido por el operador.
C.T. Guangopolo:	Central Termoeléctrica Guangopolo.
HMI:	Interfaz Humano Máquina, permite la interacción del operador y la máquina para supervisión y control de procesos.
MCI:	Motor de combustión interna.
MPU:	Magnetic Pickup, sensor de detección de velocidad de máquina motriz.
MODBUS:	Es un protocolo de comunicaciones situado en el nivel 7 del modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, que goza de mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales.
PLANTA:	representa uno de los componentes físicos de un sistema de control.
PLC:	Controlador Lógico Programable, dispositivo digital utilizado para la automatización de procesos.
Procedimiento:	En el capítulo 7. Se habla del procedimiento como el documento en el que se registra las pruebas realizadas en la unidad de generación.
SISTEMA: DE CONTROL	es un conjunto de elementos que interactúan para conseguir que la salida de un proceso se comporte tal y como se desea, mediante una acción de control.
UG4:	Unidad de generación No. 4.
UNIDAD:	Organización o espacio físico total donde se encuentra implantado el sistema de generación eléctrica.