

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO  
ABAD DEL CUSCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,  
ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



---

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR DE  
INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE 7.5 kW DE POTENCIA,  
OPERANDO COMO GENERADOR ELÉCTRICO, MEDIANTE  
EL USO DE UN BANCO DE PRUEBAS.**

---

**Tesis para Optar al Título Profesional de  
Ingeniero Electricista**

**Autor:**

**Bach. Roxana Huamán Conde**

**Asesor:**

**Ing. Manuel Lau Pacheco**

**Cusco – Perú**

**2022**

**DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de tesis a Dios por su gran misericordia, fidelidad, su buena voluntad agradable y perfecta, quien me dio las fuerzas necesarias para lograr cada meta propuesta.

A mis papas que velan orando por el bienestar de sus hijas, a mi esposo, a mi pequeña, a mi amigo y hermano Edgar Q. Ñ., por ser personas valiosas y motivadoras.

## INTRODUCCIÓN

La presente tesis, ha sido motivada por el problema que se ve en diferentes partes de nuestro país, lugares alejados de las redes eléctricas, envista de que mucho de estos lugares cuentan con recursos hídricos que no son aprovechadas para su propio desarrollo, por otra parte, la parte económica de cada lugar hace que no puedan ser parte del sistema eléctrico interconectado nacional y lo más importante será un complemento al desarrollo académico.

Se propone hacer un estudio del comportamiento del motor de inducción operando como generador eléctrico, que es parte del diseño de un banco de pruebas compuesta por maquinas reversibles bomba-motor con la finalidad de generar energía eléctrica o bombeo, todo este estudio es parte del proyecto de investigación titulada “estudio del comportamiento de una bomba centrifuga de 7.5 kW operando como turbina hidráulica para generación de energía mediante el uso de banco de pruebas” bajo el marco del programa Yachayninchis Wiñarinanpaq financiado con fondos Canon, convocado por el vicerrectorado de investigación en el año 2017, dentro del cual la UNSAAC firma convenio con CONCYTEC para la selección, supervisión y seguimiento de dicho proyectos por intermedio de fondo nacional de desarrollo científico, tecnológico y de innovación tecnológica (FONDECYT), que forma parte del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación tecnológica (SINACYT).

En este sentido se ha estructurado la tesis en los siguientes capítulos:

En el primer capítulo hace referencia al planteamiento y formulación del problema, tanto técnicos y económicos, la justificación del estudio de la tesis, los alcances y limitaciones, se describe lo que se tiene, así como la propuesta de estudio presentada.

En el segundo capítulo se muestra al marco teórico, donde se describen las maquinas eléctricas rotativas, componentes de las centrales hidroeléctricas compuestas con máquinas reversibles y el motor eléctrico WEG su principio de funcionamiento todo lo que abarca para ver su comportamiento.

En el tercer capítulo se realizan, cálculos para el modelamiento de los parámetros eléctricos de un motor, operando como generador, cálculo de valor del banco de capacitores por medio de varios métodos, análisis de los resultados obtenidos con datos teóricos, cálculos de las pérdidas y finalmente simulación de los mismos valores teóricos usando el programa Matlab.

En el cuarto capítulo se analiza y desarrolla el comportamiento del grupo hidroeléctrico el diseño del sistema de transmisión, diseño y selección para el control y automatización del banco de pruebas, sistema de regulación del control de la tensión y frecuencia, desarrollo del software para la recolección de resultados.

En el quinto capítulo se muestra el desarrollo, el análisis y la evaluación de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio, dando a conocer valores reales obtenidos experimentalmente, se muestra el comportamiento de los valores de los parámetros eléctricos mediante curvas, donde se observa en cada figura.

El sexto capítulo hace referencia al análisis económica del banco de pruebas, análisis y evaluación de los resultados del Metrados y Presupuestos, igualmente se hace una comparación económica con otro grupos de generación como el grupo convencional formada por generador y turbina Michel Banki, por otro lado el grupo bomba turbina acoplado al motor auto excitado, mediante esta evaluación económica llegaremos a dar a conocer si la propuesta del grupo de generación desarrollada sea una buena alternativa frente a otros grupo que cumplen el mismo fin.

Finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones de la tesis tomando en cuenta los límites y comodidades presentadas dentro del desarrollo del contenido de la tesis, así como también dentro del desarrollo del proyecto de investigación.

## RESUMEN

El impacto de la contaminación del ambiente en el calentamiento global y los cambios climáticos resultantes causados por el avance de diversas tecnologías pueden tener consecuencias desastrosas a largo plazo. El desarrollo tecnológico para la generación de energía eléctrica se está orientando hacia las fuentes seguras y renovables como la eólica, fotovoltaica, las celdas de combustible, hidráulica, así como el recurso mini y micro hidráulicos disponibles en las poblaciones aisladas o remotas que no tienen acceso al servicio de energía eléctrica pero que cuentan con recursos hídricos. Una máquina de inducción trifásica puede operar como generador de inducción auto excitado (GIAE), Si se conecta un banco de capacitores con un valor apropiado a las terminales de la máquina mientras el rotor es impulsado por un primo motor a una velocidad apropiada, se establecerá un voltaje cuyo valor estará determinado por la saturación magnética para esto existe varios métodos de hallar el valor del capacitor. En aplicaciones de energía renovable de baja y mediana potencia (hasta 100 kW), el generador de inducción auto excitado ofrece muchas ventajas debido a su robustez, bajo costo, ausencia de escobillas (rotor jaula de ardilla), construcción sencilla, mantenimiento fácil, mayor estabilidad, auto protección en condiciones de falla y libre de problemas de operación por muchos años. Sin embargo, la demanda de potencia reactiva y una pobre regulación de voltaje y frecuencia cuando la velocidad o la carga es variable, son las principales desventajas cuando el motor eléctrico weg va operando como generador, durante las pruebas desarrolladas a carga constante, carga variable, a diferentes rangos de velocidad y saltos de altura, se observó el comportamiento de la máquina inducción operando como generador. Se determinó que es recomendable para una carga constante. Cuando la carga es variable, es muy difícil controlar el nivel de tensión y frecuencia. Siendo una máquina adaptable a cualquier cambio es una gran opción para un grupo de generación no convencional en zonas aisladas por que el costo de instalación y costos kW – h generado son más accesibles.

## ABSTRAC

The impact of environmental pollution on global warming and the resulting climate changes caused by the advancement of various technologies can have disastrous long-term consequences. Technological development for the generation of electrical energy is orienting itself towards safe and renewable sources such as wind, photovoltaic, fuel cells, hydraulics, as well as the mini and micro hydro resources available in isolated or remote populations that do not have access to electricity. to the service of electrical energy but that have hydric resources. A three-phase induction machine can operate as a self-excited induction generator (GIAE). If a capacitor bank of an appropriate value is connected to the terminals of the machine while the rotor is driven by a prime mover at an appropriate speed, it will establish a voltage whose value will be determined by the magnetic saturation for this there are several methods to find the value of the capacitor. In low and medium power renewable energy applications (up to 100 kW), the self-excited induction generator offers many advantages due to its robustness, low cost, absence of brushes (squirrel-cage rotor), simple construction, easy maintenance, higher stability, self-protection under fault conditions and trouble-free operation for many years. However, the demand for reactive power and poor regulation of voltage and frequency when the speed or load is variable, are the main disadvantages when the electric motor weg is operating as a generator, during the tests carried out at constant load, variable load, At different speed ranges and height jumps, the behavior of the induction machine operating as a generator was observed. It was determined that it is recommended for a constant load. When the load is variable, it is very difficult to control the level of voltage and frequency. Being a machine adaptable to any change, it is a great option for a non-conventional generation group in isolated areas because the cost of installation and kW - h generated costs are more accessible.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
RESUMEN.....	5
ABSTRAC.....	6
ÍNDICE.....	7
SIMBOLOGÍA.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS.....	15
CAPITULO I.....	16
<b>1 ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>16</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1 <i>Formulación del problema.....</i>	<i>17</i>
1.2.2 <i>Problema General.....</i>	<i>19</i>
1.2.3 <i>Problemas específicos.....</i>	<i>19</i>
1.3 OBJETIVOS.....	19
1.3.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>19</i>
1.3.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
1.4 HIPÓTESIS.....	20
1.4.1 <i>Hipótesis General.....</i>	<i>20</i>
1.4.2 <i>Hipótesis Específicas.....</i>	<i>20</i>
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	20
1.6 METODOLOGÍA.....	21
1.6.1 <i>Tipo, nivel y diseño de la investigación.....</i>	<i>21</i>
1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	21
1.7.1 <i>Alcances.....</i>	<i>21</i>
1.7.2 <i>Limitaciones.....</i>	<i>22</i>
1.8 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	22
CAPITULO II.....	23
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>23</b>
2.1 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	23
2.2 FUNDAMENTO TEÓRICO.....	25
2.2.1 <i>Centrales Hidroeléctricas.....</i>	<i>25</i>

2.2.2	<i>Micro Centrales Hidroeléctricas.</i>	25
2.2.3	<i>Componentes de una Micro Central Hidroeléctrica</i>	26
2.2.4	<i>Maquinas Eléctricas Rotativas de Corriente Alterna</i>	29
2.2.5	<i>Importancia de los grupos de generación con máquinas reversibles.</i>	44
2.2.6	<i>Importancia de Grupos de Generación Hidroeléctrica Aislada</i>	45
2.2.7	<i>Regulación de Tensión y Frecuencia en Grupos de Generación Hidroeléctricas Aisladas</i>	45
2.2.8	<i>Posibles Aplicaciones de Motores de Inducción como Generadores.</i>	46
2.2.9	<i>Ventajas de los Motores de Inducción como Generadores.</i>	48
<b>CAPITULO III</b>		<b>49</b>
<b>3 MODELAMIENTO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MOTOR OPERANDO COMO GENERADOR 49</b>		
3.1	INTRODUCCIÓN	49
3.2	CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.	49
3.3	METODOLOGÍA	53
3.4	SELECCIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN PARA OPERACIÓN COMO GENERADOR.	54
3.5	MODELAMIENTO Y CALCULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.	55
3.5.1	<i>Modelamiento por la técnica del Haque.</i>	56
3.6	DIMENSIONAMIENTO DE BANCO DE CAPACITORES PARA EL GENERADOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.	58
3.6.1	<i>El Capacitor de Excitación</i>	59
3.6.2	<i>Efecto de la Variación del Capacitor de Excitación.</i>	60
3.6.3	<i>Cálculo del Banco de Capacitores para MAG.</i>	61
3.6.4	<i>El Proceso de Autoinducción.</i>	68
3.7	PÉRDIDAS Y DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA	68
3.7.1	<i>Cálculo de las pérdidas del motor de inducción</i>	69
3.8	ANÁLISIS A PARTIR DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN.	69
<b>CAPITULO IV</b>		<b>75</b>
<b>4 CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DEL GRUPO HIDROELÉCTRICO 75</b>		
4.1	DEFINICIÓN DE UNA ARQUITECTURA DE RED COMUNICACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL.	75
4.2	TIPOS DE REDES DE COMUNICACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL.	75
4.2.2	<i>Selección de una arquitectura de comunicación para el control de banco de pruebas.</i>	76
4.2.3	<i>Software SCADA para automatización del grupo de generación.</i>	77
4.2.4	<i>Sistema de Control y Automatización para el Banco de Pruebas</i>	78
4.2.5	<i>software de control.</i>	79
4.2.6	<i>Sensores, Actuadores y Periféricos.</i>	79

4.2.7	<i>Selección de software de automatización para el banco de pruebas.....</i>	<i>80</i>
4.2.8	<i>Diseño de diagramas de flujo para la implementación del sistema SCADA para el banco de pruebas.....</i>	<i>81</i>
4.2.9	<i>Instalación de los tableros de control.....</i>	<i>82</i>
4.2.10	<i>Instalación del MAG.....</i>	<i>87</i>
<b>CAPITULO V.....</b>		<b>93</b>
<b>5 PRUEBAS DE LABORATORIO.....</b>		<b>93</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	93
5.2	NORMAS Y PROCEDIMIENTOS.....	93
5.3	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	95
5.3.1	<i>Prueba 01.....</i>	<i>95</i>
5.3.2	<i>Prueba 02.....</i>	<i>96</i>
5.3.3	<i>Prueba 03.....</i>	<i>102</i>
5.3.4	<i>Prueba 04.....</i>	<i>107</i>
5.3.5	<i>Prueba 05.....</i>	<i>113</i>
<b>CAPITULO VI.....</b>		<b>118</b>
<b>6 EVALUACIÓN ECONÓMICA.....</b>		<b>118</b>
6.1	GENERALIDADES.....	118
6.1.1	<i>Objetivo de la Evaluación Económica.....</i>	<i>118</i>
6.1.2	<i>Alternativas de Generación.....</i>	<i>118</i>
6.2	PRESUPUESTO BASE.....	119
6.2.1	<i>Presupuesto base de Grupos de Generación.....</i>	<i>119</i>
6.3	EVALUACIÓN DE COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES.....	122
6.3.1	<i>Costos Fijos.....</i>	<i>122</i>
6.3.2	<i>Costos Variables.....</i>	<i>122</i>
6.3.3	<i>Costos Totales.....</i>	<i>123</i>
6.4	DETERMINACIÓN DE COSTOS DE KWH INSTALADO Y KWH PRODUCIDO.....	124
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>128</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>131</b>
<b>ANEXO.....</b>		<b>133</b>

## SIMBOLOGÍA

F	: Frecuencia eléctrica.
H	: Altura de la caída de agua.
I	: Corriente eléctrica.
Ng	: Velocidad de la turbina.
Nt	: Velocidad del generador.
Ns	: Velocidad Síncrona.
Nn	: Velocidad Nominal.
Pe	: Potencia eléctrica.
PL	: Potencia de carga.
Pm	: Potencia mecánica.
Pn	: Potencia nominal.
Pr	: Potencia resultante.
Pv	: Posición de la válvula.
Q	: Caudal de agua.
R	: Resistencia eléctrica.
Rr	: Resistencia del rotor.
Rs	: Resistencia del estator.
t	: Tiempo.
v	: Velocidad del agua.
V	: Voltaje o tensión.
X	: Reactancia.
Z	: Impedancia.
H	: Rendimiento.
$\Theta$	: Posición angular.
$\Phi$	: Flujo magnético.
$\omega$	: Velocidad angular.
$\omega_m$	: Velocidad angular nominal.
CA	: Corriente alterna.
CD	: Corriente continua.
kW	: Kilovatios.
VA	: Volt-amperio.
kVA	: Kilo-voltamperio.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Bomba operando como turbina y motor como generador asíncrono.</i>	18
<i>Figura 2. Esquema de motor WEG asíncrono como generador de inducción</i>	18
<i>Figura 3. Diseño y equipos electromecánicos</i>	27
<i>Figura 4. Bomba Centrífuga</i>	27
<i>Figura 5. Turbina Michell Banki</i>	28
<i>Figura 6. Alternador Síncrono</i>	28
<i>Figura 7. Motor de Inducción</i>	28
<i>Figura 8. Tablero de Control</i>	29
<i>Figura 9. Diagrama de la Clasificación de Tipos de Motores más Utilizados</i>	30
<i>Figura 10. Secuencia Lógica de Actividades programadas durante el proceso de desarrollo.</i>	31
<i>Figura 11. Diagrama de Circuito Equivalente Completo de una máquina de inducción</i>	32
<i>Figura 12. Clase de Diseño</i>	33
<i>Figura 13. Forma del Rotor según la Norma NEMA</i>	33
<i>Figura 14. Curva típica Torque vs Velocidad según Norma NEMA</i>	34
<i>Figura 15. Clasificación del motor según norma NEMA</i>	35
<i>Figura 16. Fuente: (Nema Class B, 2009, pág. 23)</i>	35
<i>Figura 17. Aplicaciones más habituales de los motores de inducción</i>	36
<i>Figura 18. Estator del Motor de Inducción Jaula de Ardilla</i>	36
<i>Figura 19. Rotor del Motor de Inducción Jaula de Ardilla</i>	37
<i>Figura 20. Partes principales del motor</i>	37
<i>Figura 21. Circuito equivalente por fase del motor de inducción</i>	38
<i>Figura 22. Circuito equivalente referido al estator</i>	38
<i>Figura 23. Fórmulas de las potencias, torques y pérdidas del motor</i>	39
<i>Figura 24. Circuito equivalente Thévenin del motor</i>	39
<i>Figura 25. Circuito equivalente Thévenin para el cálculo del par de la máquina.</i>	40
<i>Figura 26. Circuito equivalente del motor de inducción.</i>	40
<i>Figura 27. Par versus deslizamiento.</i>	41
<i>Figura 28. Par versus deslizamiento para una resistencia retorica.</i>	41
<i>Figura 29. Curva del Par versus deslizamiento máximo</i>	42
<i>Figura 30. Tipo de ranuras del rotor.</i>	42
<i>Figura 31. Representación de las características de una maquina</i>	43
<i>Figura 32. Grupo de Generación no convencional aislada.</i>	46
<i>Figura 33. posibles aplicaciones de motores de inducción como generadores en micro centrales hidroeléctricas</i>	47
<i>Figura 34. Clasificación de los motores de inducción según las normas NEMA, IEC.</i>	50
<i>Figura 35. Placa de características de motor jaula de ardilla WEG.</i>	51

<i>Figura 36. Configuración en estrella y delta respectivamente, dos capacitores de excitación en cada máquina trifásica</i>	53
<i>Figura 37. Motor jaula de ardilla WEG</i>	55
<i>Figura 38. Circuito equivalente del motor jaula de ardilla</i>	56
<i>Figura 39. Circuito equivalente del motor jaula de ardilla</i>	58
<i>Figura 40. Características de operación del capacitor de excitación</i>	60
<i>Figura 41. Característica Tensión vs. Corriente de excitación y de magnetización</i>	61
<i>Figura 42. Grupo Hidroeléctrico aislada operando con máquinas reversibles</i>	61
<i>Figura 43. circuito equivalente por fase del MAG auto excitado bajo una carga RL</i>	62
<i>Figura 44. Puesta en marcha de un MAG en funcionamiento aislado utilizando dos conjuntos separados de condensadores</i>	66
<i>Figura 45. Capacitor de trabajo</i>	67
<i>Figura 46. Diferencias entre un capacitor de arranque y de marcha</i>	67
<i>Figura 47. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción</i>	68
<i>Figura 48. Torque vs velocidad del motor WEG</i>	70
<i>Figura 49. Corriente de magnetización vs velocidad del motor.</i>	70
<i>Figura 50. Torque vs la velocidad del MAG sin carga.</i>	71
<i>Figura 51. Corriente de magnetización vs velocidad del MAG.</i>	71
<i>Figura 52. Torque vs velocidad del MAG a plena carga.</i>	72
<i>Figura 53. Corriente de magnetización vs velocidad del MAG a plena carga</i>	72
<i>Figura 54. Tensión de salida vs corriente de excitación del MAG.</i>	73
<i>Figura 55. Torque vs velocidad, motor y generador.</i>	73
<i>Figura 56. Torque vs velocidad operación motor y como generador.</i>	74
<i>Figura 57. Tipos de Red de Comunicación</i>	76
<i>Figura 58. Sistema de software SCADA.</i>	77
<i>Figura 59. Regulador mecánico utilizado para el control de turbinas de generación eléctrica</i>	78
<i>Figura 60. sistema de control moderno con carga lastre.</i>	79
<i>Figura 61. sensores, actuadores, periféricos.</i>	79
<i>Figura 62. Software HTML</i>	80
<i>Figura 63. Sistema de control HTML</i>	81
<i>Figura 64. Diseño de diagrama de flujo para la implementación del sistema SCADA para el banco de pruebas.</i>	81
<i>Figura 65. Tableros de control de todo en banco de pruebas.</i>	82
<i>Figura 66. Tablero de control con PIC.</i>	82
<i>Figura 67. Implementos del Tablero de control con PLC.</i>	83
<i>Figura 68. Tablero de control del THC.</i>	83
<i>Figura 69. Implementación del tablero de control del THC.</i>	84
<i>Figura 70. Tablero de control de BFT</i>	84

Figura 71. Implementos del tablero de control de BFT	85
Figura 72. Módulo de entradas analógicas SM1238	85
Figura 73. Analizador de redes SENTRON PAC3200	86
Figura 74. Tablero general del banco de pruebas.	87
Figura 75. Fundaciones del motor.	88
Figura 76. Base metálica de reservorio a los pies del MAG apoyado sobre vigas	89
Figura 77. Ajuste angular (paralelismo).	90
Figura 78. Ajuste radial (concentricidad).	90
Figura 79. Ajuste axial	90
Figura 80. Acoplamiento del MAG por correa.	91
Figura 81. Montaje de poleas.	91
Figura 82. Desmontaje de la polea.	91
Figura 83. Posicionamiento correcto de poleas.	92
Figura 84. tensiones en la correa.	92
Figura 85. Velocidad del generador en Vacío con respecto al tiempo	96
Figura 86. Variación de posiciones para cada hornilla	97
Figura 87. Tensiones de línea a carga mínima	98
Figura 88. Corrientes de línea a carga mínima	98
Figura 89. Potencia activa con carga mínima.	99
Figura 90. Velocidad del generador con carga mínima	99
Figura 91. Tensiones de línea con carga mediana.	99
Figura 92. Corrientes de línea para carga mediana	100
Figura 93. Potencia Activa con carga mediana	100
Figura 94. Velocidad de la bomba a carga mediana	100
Figura 95. Tensiones de línea con carga máxima.	101
Figura 96. Corrientes de línea a carga máxima	101
Figura 97. Potencia Activa con cargas máximas	101
Figura 98. Velocidad con carga máxima	102
Figura 99. Tensiones de línea a velocidad mínima carga constante	104
Figura 100. Corrientes de línea a velocidad mínima carga constante	104
Figura 101. Potencia activa a velocidad mínima carga constante	105
Figura 102. Tensiones de línea a velocidad media carga constante	105
Figura 103. Corrientes de línea a velocidad media carga constante.	105
Figura 104. Potencia Activa a velocidad variable carga constante.	106
Figura 105. Tensiones de línea a velocidad máxima carga constante.	106
Figura 106. Corrientes de línea a velocidad máxima carga constante	106
Figura 107. Velocidad vs potencia generada a velocidad variable	107
Figura 108. Tensiones de línea a caudal mínima carga constante.	108

<i>Figura 109. Corrientes de línea a caudal mínima carga constante.</i>	108
<i>Figura 110. Potencia Activa a caudal mínima carga constante.</i>	109
<i>Figura 111. Velocidad a caudal mínima carga constante.</i>	109
<i>Figura 112. Tensiones de línea a caudal media carga constante</i>	110
<i>Figura 113. Corrientes de línea a caudal media carga constante.</i>	110
<i>Figura 114. Potencia Activa a caudal media carga constate.</i>	110
<i>Figura 115. Velocidad a caudal media carga constante</i>	111
<i>Figura 116. Tensiones de línea a caudal máximo carga constante</i>	111
<i>Figura 117. Corrientes de línea a caudal máxima carga constante</i>	111
<i>Figura 118. Potencia activa a caudal máximo carga constante</i>	112
<i>Figura 119. Velocidad a caudal máxima con carga constante</i>	112
<i>Figura 120. Caudal vs la Potencia Generada a caudal variable.</i>	112
<i>Figura 121. Potencia vs caudal</i>	115
<i>Figura 122. Eficiencia del sistema vs caudal.</i>	115
<i>Figura 123. Velocidad vs la potencia</i>	116
<i>Figura 124. Altura vs el caudal</i>	116
<i>Figura 125. Eficiencia vs la velocidad</i>	117
<i>Figura 126. Costos de KW instalado.</i>	126
<i>Figura 127. Costos de KW-h generado.</i>	126

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i>	<i>Clasificación para pequeños aprovechamientos hidro-energéticos según la capacidad instalada y el tipo de usuario en las ZNI.</i>	26
<i>Tabla 2.</i>	<i>Norma NEMA de las características de diseño para varios Torques para aplicaciones a diferentes cargas.</i>	34
<i>Tabla 3.</i>	<i>Ventajas del uso del Generador de Inducción</i>	48
<i>Tabla 4.</i>	<i>Clasificación de los motores de inducción según su eficiencia.</i>	51
<i>Tabla 5.</i>	<i>Grado de protección según a la primera cifra característica</i>	51
<i>Tabla 6.</i>	<i>Grado de protección según a la segunda cifra característica</i>	52
<i>Tabla 7.</i>	<i>Relación de tensión y corriente en circuitos trifásicos conectados en estrella y delta</i>	54
<i>Tabla 8.</i>	<i>Datos de Placa de Características</i>	55
<i>Tabla 9.</i>	<i>Datos de entrada para el calculo</i>	57
<i>Tabla 10.</i>	<i>Resultados de los parámetros del motor</i>	58
<i>Tabla 11.</i>	<i>Valores mínimos, medianos y máximos sin carga</i>	96
<i>Tabla 12.</i>	<i>Valores mínimos, medianos y máximos para carga variable</i>	102
<i>Tabla 13.</i>	<i>Valores mínimos, medianos y máximos a velocidad variable</i>	107
<i>Tabla 14.</i>	<i>Valores mínimos, medianos y máximos a caudal variable.</i>	113
<i>Tabla 15.</i>	<i>Pruebas grupo hidroeléctrico con diferentes tipos de carga</i>	114
<i>Tabla 16.</i>	<i>Datos de salida, tablero de control grupo hidroeléctrico.</i>	114
<i>Tabla 17.</i>	<i>Metrado y Presupuesto de la micro central hidroeléctrica con bomba turbina de 7.5kW</i>	120
<i>Tabla 18.</i>	<i>Metrado y Presupuesto de la micro central hidroeléctrica con turbina hidráulica.</i>	121
<i>Tabla 19.</i>	<i>Costos Fijos y Costos de Instalación del grupo bomba turbina</i>	125
<i>Tabla 20.</i>	<i>Costos Fijos y Costos de Instalación del grupo Michel Banki</i>	125
<i>Tabla 21.</i>	<i>Datos experimentales del MAG a velocidad mínima</i>	139

## CAPITULO I

### 1 ASPECTOS GENERALES

#### 1.1 Introducción

La aplicación de un sistema de generación no convencional con el uso de equipamiento disponible (Motor trifásico de 7.5 kW y una bomba de tipo Centrifuga de 7.5 HP), con los cuales mediante una configuración mecánica eléctrica se podrá implementar un pequeño sistema de generación de energía eléctrica. Como una fuente alternativa de solución para la disponibilidad de energía en zonas de ubicación extrema donde la infraestructura eléctrica no ha llegado y la población no cuenta con el recurso suficiente para poder tener alcance al mismo. Consiguientemente el presente trabajo de investigación busca darle una alternativa de solución a esta problemática y el cual es una de las motivaciones para su desarrollo. Como parte del desarrollo del presente trabajo denominado: “Estudio del comportamiento de una bomba centrifuga de 7.5 kW de potencia, operando como turbina para generación de energía, mediante el uso de banco de pruebas”. Proyecto que nos permitirá desarrollar, diferentes temas de investigación tanto como analizar y estudiar el comportamiento en la parte mecánica de la bomba operando como turbina y en el caso del motor eléctrico, operando como un generador eléctrico. Entre otros temas que se desarrollaran en el contenido del presente estudio. En el caso específico del presentante trabajo tendremos el estudio del comportamiento de un motor trifásico WEG MOD TE1BFOXO# de 7.5 kW, el cual se comportará como un generador eléctrico trifásico mediante el uso de un Banco de Pruebas de laboratorio.

El presente trabajo de investigación busca dejar un antecedente de estudio para posteriores trabajos de investigación y como un aporte académico en el área de ciencia y tecnología en el marco del desarrollo de fuentes de energía renovales y de tipo no convencional.

El uso de máquinas reversibles es una solución y una alternativa para aprovechar la existencia de recurso hídrico en lugares alejados, con el empleo de equipos de bajos costos de adquisición y de instalación para zonas o comunidades alejadas que carecen de servicio eléctrico o simplemente no cuentan con la infraestructura eléctrica adecuada.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

### **1.2.1 Formulación del problema**

Las energías renovables son una buena alternativa que demuestran una gran rentabilidad económica además de ser una alternativa apropiada para lugares con bajos recursos económicos como son nuestras comunidades rurales, además que las mismas cuentan con recursos naturales locales y no requieren de una inversión para combustible de los sistemas hidráulicos de generación eléctrica.

Por tal motivo se plantea aprovechar los recursos propios del lugar para el abastecimiento de energía eléctrica en el medio rural, generando energía independiente. Las zonas alejadas de la ciudad de Cusco a falta de energía de bajo costo son afectadas por cambios climáticos tiene impacto en la salud, la agricultura, el desarrollo económico, entre otros.

Aprovechando los lugares donde existen recursos renovables, se pueden instalar tecnologías de bajo costo y fácil adquisición de forma que los servicios de mantenimiento y reposición de piezas sean accesibles en locales distantes de nuestra ciudad, estas alternativas puedan ser para uso propio. Donde se puede lograr instalaciones de bajo costo por kW instalado y kW-hora generado, que puedan reemplazar los costos de la energía comercial, inclusive en lugares donde llegan las redes eléctricas de la concesionaria Electro Sur Este.

El uso de grupos de generación de energía hidráulica no convencionales utilizando bomba centrifugas que operando en forma inversa puedan comportarse como turbinas de generación, accionando un motor eléctrico tipo jaula de ardilla que trabajando en forma inversa se comporte como un generador de inducción, haciendo este conjunto un grupo hidroeléctrico no convencional. Los usos de este tipo de grupos de hidroeléctricos podrían presentarse como una opción interesante, debida que en el mercado local y nacional se cuenta con una infinidad de marcas y capacidades de bombas hidráulicas y motores eléctricos que permitirían reducir los costos en cuanto a instalación y operación.

El Perú y la Región Cusco, cuenta con grandes recursos hídricos, especialmente en zonas rurales de la sierra y ceja de selva, en lugares zonas rurales aisladas donde se presenta dificultades de abastecimiento de energía eléctrica, relacionadas con las distancias entre los puntos de generación, distribución y consumo. Por otro lado, esta alternativa de generación también podría ser utilizada para calefacción eléctrica para contrarrestar los efectos de los friajes y para propiciar el uso de energía eléctrica para la

agroindustria rural, que por sus bajos costos se presentaría como una importante alternativa de desarrollo y promover el abastecimiento de energía a partir de fuentes renovables.

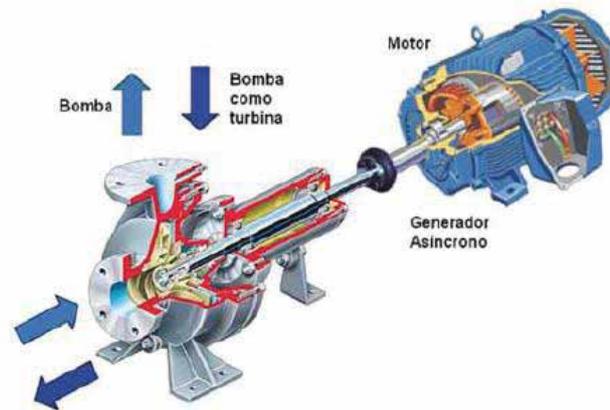


Figura 1. Bomba operando como turbina y motor como generador asíncrono.

Fuente: (Ortiz Florez)

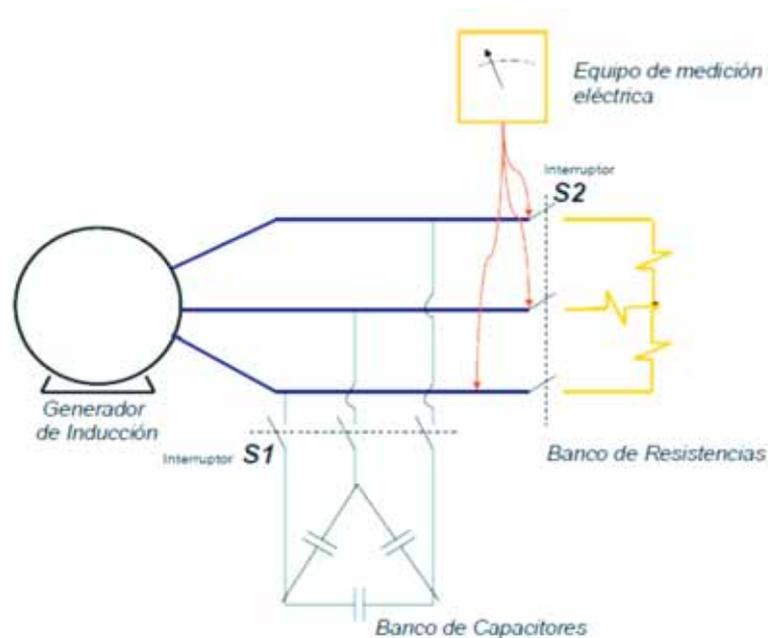


Figura 2. Esquema de motor WEG asíncrono como generador de inducción

Fuente: (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011)

Nota: a partir de acá y para adelante se usará la siguiente abreviación:

MAG = Motor de inducción trifásico WEG MOD TE1FOXO# de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico.

PAT= Bomba trabajando como turbina.

## **1.2.2 Problema General**

¿Cómo evaluar y analizar experimentalmente el comportamiento del Motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico?

## **1.2.3 Problemas específicos**

### **1.2.3.1 Problemas técnicos.**

1. ¿En qué medida es posible determinar la modelación matemática de los parámetros eléctricos del motor eléctrico WEG que se someterá a pruebas?
2. ¿Es posible que el motor eléctrico operando en forma inversa pueda trabajar como generador de inducción trifásica accionado por una bomba que trabaje en forma inversa como turbina?
3. ¿Es posible que el MAG pueda trabajar en diferentes rangos de velocidad (RPM) para generación de energía eléctrica?
4. ¿En qué medida influirá la altura de salto en los parámetros eléctricos del MAG?

### **1.2.3.2 Problema económico.**

5. ¿Es posible que el MAG para la generación de energía eléctrica, pueda competir económicamente con un generador síncrono convencional?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Analizar y evaluar el comportamiento del motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico, mediante el uso de un banco de pruebas.

### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

#### **1.3.2.1 Objetivos técnicos.**

1. Desarrollar la modelación matemática de los parámetros eléctricos del motor eléctrico WEG que será probado en un banco de pruebas.
2. Hacer funcionar el motor eléctrico WEG en forma inversa para evaluar su comportamiento como generador de inducción trifásica cuando es accionado por una bomba centrífuga que trabajara en forma inversa como turbina.
3. Hacer funcionar el motor eléctrico WEG como generador de inducción trifásica a diferentes rangos de velocidad (RPM) a diferentes saltos de altura y caudal en el banco de pruebas, para generar energía eléctrica.
4. Analizar y evaluar las posibles alteraciones de los parámetros eléctricos para determinar sus condiciones de operatividad, cuando el MAG opere en condiciones diferentes de saltos de altura

### **1.3.2.2 Objetivos Económicos.**

5. Analizar los costos de instalación (US\$/kW) y los costos de generación (US\$/kW-hora) de la producción de energía del MAG comparado con un generador síncrono convencional.

## **1.4 Hipótesis**

### **1.4.1 Hipótesis General**

Analizando y evaluando el comportamiento del motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico, se podrá determinar la eficiencia del MAG, mediante el uso de un banco de pruebas.

### **1.4.2 Hipótesis Específicas**

#### **1.4.2.1 Hipótesis técnicas.**

1. El desarrollo de la modelación matemática de los parámetros eléctricos de motor WEG, permitirá conocer su comportamiento teórico desde el punto de vista analítico.
2. El funcionamiento del motor eléctrico en forma inversa accionado por una bomba centrífuga que trabaja como turbina, permitirá evaluar su comportamiento como generador de inducción.
3. La operación del MAG en diferentes rangos de velocidades, permitirá evaluar su operación a diferentes RPM y a diferentes saltos de altura.
4. El análisis y la evaluación del comportamiento de los parámetros eléctricos permitirá conocer el comportamiento del motor en condiciones diferentes de saltos de altura.

#### **1.4.2.2 Hipótesis económica.**

5. El análisis de los costos de instalación (US\$/kW) y costos de generación (US\$/kW-hora) del MAG, comparándolos con un generador síncrono convencional, permitirá conocer su viabilidad económica.

## **1.5 Justificación del Estudio**

El presente estudio se justifica en el hecho que actualmente no están operando micro centrales hidroeléctricas que generan energía eléctrica, Desafortunadamente ampliar la red nacional a las comunidades rurales aisladas no es viable, tanto técnica cuanto económicamente por la carga pequeña; La actual tendencia en electrificación rural

en el mundo es utilizar recursos energéticos renovables, debido al avance tecnológico y costos de construcción razonables, los cuales se han convertido en primordiales.

El presente estudio se justifica por el hecho de que el constante avance tecnológico, en el desarrollo de la sociedad y la demanda creciente de la energía eléctrica, supone retos que necesariamente se debe asumir y hacer estudios. Y según el desarrollo creciente tener una serie de alternativas de generación eléctrica que nos permita mejorar los procesos de generación de energía eléctrica a comunidades aisladas. Se escogió un motor de inducción trifásico de rotor de jaula de ardilla por su simplicidad y reducido costo de mantenimiento el cual es preferido de los accionamientos industriales y requiere de una sola fuente para su operación.

Al desarrollar estas teorías de generación se ahorrarían divisas que tenía que pagarse en regalías al poseedor de estas tecnologías.

## 1.6 Metodología

Enfoque hipotético deductivo.

En el presente trabajo de investigación se realizará una investigación aplicada tecnológica aplicando el método cuantitativo (en ingeniería).

### 1.6.1 Tipo, nivel y diseño de la investigación

**Tipo** : La investigación es del tipo **Aplicada**, utilizando el método **Cuantitativo**.

**Nivel** : Exploratoria, descriptiva.

**Diseño** : Experimental Particular.

- **El estudio exploratorio** se centra en descubrir, es indispensable aproximarnos a ellos, con una adecuada revisión de la literatura.

- **Los estudios descriptivos** buscan desarrollar una imagen o fiel representación (descripción) del fenómeno estudiado a partir de sus características. Describir en este caso es sinónimo de medir.

## 1.7 Alcances y Limitaciones del Estudio

### 1.7.1 Alcances

- El motor de inducción podrá ser probado como generador hasta una potencia eléctrica de 7.5 kW por la capacidad hidráulica de salto altura y caudal del banco de pruebas.

- Se efectuarán pruebas experimentales conectada a diferentes cargas, esto para verificar y estudiar en forma práctica el comportamiento de los parámetros de entrada y salida del motor eléctrico WEG.
- Se analizará el comportamiento del motor operando como generador a la altura de 3,200 msnm.

### **1.7.2 Limitaciones**

- No se podrá probar equipos con potencias superiores a 10 kW.
- No se realizará pruebas con cargas puramente inductiva y capacitiva. Debido a que no se cuentan con estos de carga.
- Las condiciones hidráulicas para generación serán proporcionadas por una bomba centrífuga que proporcionará como máximo un caudal de 4000(l/min) una presión estática de 25 metros.

## **1.8 Descripción del Proyecto**

La presente tesis de investigación tecnológica se desarrolla en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, FIEEIM, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a una altitud de 3350 msnm,

Teniendo en cuenta los problemas descritos anteriormente se propone que el motor de inducción seleccionado para el desarrollo de este proyecto es de modelo TE1BFOXO con una potencia de 7.5 kW de marca WEG, dicho motor será utilizado para trabajar dentro de un banco de pruebas con el fin de generar energía eléctrica donde el motor será accionado por una bomba que operará como turbina.

Es una mejor opción de prestación de servicio a la comunidad universitaria y a la sociedad rural en general y que apoye al trabajo de electrificación de las zonas más alejadas de nuestra ciudad, con estas propuestas estaremos ofreciendo al exterior una imagen acorde con los tiempos actuales.

Dentro del trabajo de tesis se hará un estudio del comportamiento del motor de inducción, dentro y como grupo de generación de energía eléctrica utilizando máquinas reversibles (una bomba operando como turbina y un motor de inducción como generador), de igual manera veremos principalmente el comportamiento del motor eléctrico WEG operando como un generador eléctrico implementado por banco de capacitores, estudiando las alternativas de cálculo y métodos recomendados por investigadores en el tema, también se resalta las ventajas y desventajas que se presentan al usar este tipo de grupo de generación.

## CAPITULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes Bibliográficos

El fenómeno de la incorporación de las energías renovables va en paralelo con la generación energética nacional a través del cambio de combustible a gas natural con esto se permite el cambio de la matriz de consumo y generación energética nacional debido a estos dos cambios mencionados, esto se logra gracias a que en el 2015 se dio esa iniciativa, además de que nuestro país está comprometida en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero esto permite fortalecer sus políticas de adaptación a los impactos de cambio climático. Hoy gracias a las promociones y subvenciones del estado peruano para la generación de energías renovables no convencionales, se puede cumplir con los objetivos de la política energética nacional desarrollando proyectos para el autoconsumo a través de generación de energías no convencionales lo cual ya es algo novedoso en nuestro país. El presente trabajo de tesis de desarrollo tecnológico, es desarrollado de acuerdo al plan operativo del proyecto de investigación denominado, “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA BOMBA CENTRIFUGA DE 7.5 kW DE POTENCIA, OPERANDO COMO TURBINA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE EL USO DE BANCO DE PRUEBAS” bajo el marco del programa Yachayninchis Wiñarinanpaq financiado con fondos Canon, convocado por el vicerrectorado de investigación en el año 2017, dentro del cual la UNSAAC firma convenio con CONCYTEC para la selección, supervisión y seguimiento de dicho proyectos por intermedio de fondo nacional de desarrollo científico, tecnológico y de innovación tecnológica (FONDECYT), que forma parte del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación tecnológica (SINACYT).

El presente trabajo desarrollado está enfocado en el Estudio del comportamiento del motor WEG de inducción trifásico MOD TE1BFOXO# de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico, mediante el uso de un banco de pruebas, donde se pretende analizar el comportamiento del motor eléctrico trabajando como generador acoplado a una bomba centrífuga operando como turbina.

El proyecto el cual se trabajará tiene varios antecedentes de proyectos realizados en diferentes países al cual menciono en el siguiente:

El primer lugar se tiene que, *en el 2013 fue presentando, Análisis experimental de la función de transferencia de la máquina de inducción trifásica operando como generador, por Br. Mario Alberto Juro Ferrel*, como requisito para optar el título profesional en la Universidad nacional de San Antonio Abad del Cusco.

La investigación es un estudio de un motor de inducción operando como generador donde se calcula la función de transferencia en forma analítica y en forma experimental, describiendo el principio de funcionamiento y las ecuaciones de equilibrio eléctrico y mecánico.

En segundo lugar, *en octubre de 2010 en Chile*, fue presentado, *Determinación de rangos de operación del generador de inducción para aplicación de aerogeneradores, Por Pamela Castillo Toro*, para optar título profesional en la Universidad de Chile.

La investigación es un estudio de la utilización de motor para que opere como generador, da varias alternativas dando varias metodologías para su selección observando el funcionamiento de cada tipo de motor y su parte constructiva.

En tercer lugar, *en Escola de Engenharia da UFMG, 2010 fue presentado Contribuições Para o Estudo e a Aplicação de Bombas Funcionando Como Turbinas na Geração Descentralizada, por Danilo Derick Silva Alves*. Tesis de posgrado.

La investigación es un proyecto donde se aplica motor-bomba para la generación de la energía eléctrica usando varias metodologías para usar en comunidades rurales aisladas.

Estas alternativas nos ayudan a analizar, plantear y mejorar el trabajo que se realiza dentro del proyecto de investigación, además es un buen apoyo al aprendizaje para cada estudiante, con lo que se obtenga podemos aún más desarrollar el aprendizaje de cada estudiante de cada escuela de la facultad.

Álvarez el All, (2016) en su investigación que lleva como título “Motor de Inducción Jaula de Ardilla como Generador” se planteó como principal objetivo analizar de qué manera el motor de Inducción Jaula de ardilla funciona como generador, los autores en la investigación describen la aplicación en la que se hace que una máquina de inducción funcione como generador, primeramente se conectada la máquina a la red eléctrica y posteriormente opera de forma aislada. Para ello se utilizan una máquina de inducción (motor jaula de ardilla) y una máquina de corriente continua. La robustez, confiabilidad y economía de los motores de inducción jaula de ardilla en conjunto con su poca necesidad de mantenimiento han hecho de estos motores los más usados en la operación del campo industrial, lo que ha hecho despertar el interés por los generadores

de inducción que, por sus características técnico-económicas se presentan como buenos candidatos para este tipo de aplicaciones. Entonces se concluye que al realizar la práctica experimental se demostró que es sencilla la operación de una máquina de inducción como generador y fue fácil comprender el cómo funciona de forma continua y sin interrupción.

## **2.2 Fundamento Teórico**

### **2.2.1 Centrales Hidroeléctricas.**

Una central o planta hidroeléctrica se puede definir como un conjunto de obras y maquinarias destinadas a realizar el trabajo de conversión, para obtener energía eléctrica se obtendrá a partir de la energía hidráulica del agua. La combinación de la energía potencial y cinética producida a partir del caudal de agua con una caída de altitud, la cual es convertida por una turbina en energía mecánica y seguidamente transformada por un generador en energía eléctrica. Existen parámetros importantes que identifican a una central hidroeléctrica en este caso presentamos dos siguientes, como la potencia generada y la energía que es capaz de entregar.

En el primer caso, la potencia, se obtiene a partir de la energía potencial del agua en el punto en que es introducida a la tubería que va hacia la turbina, respecto al nivel en que es liberada luego de su paso por la turbina hidráulica. Y en el segundo caso la energía que es capaz de generar dependerá tanto de la energía potencial del agua y el grupo de generación a usar,

### **2.2.2 Micro Centrales Hidroeléctricas.**

Una micro central es una clasificación que se da a las plantas hidroeléctricas con una potencia menor a 50 kW como se observa en la tabla.1, son grupos de generación que son una buena alternativa a diferencia con grandes grupos de generación convencional principalmente por factores de utilidad económica.

la clasificación de estos, dado por la Organización Latinoamericana de Energía OLADE para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos en pequeña escala según la capacidad instalada y el tipo de usuario en las zonas no interconectadas (ZNI), (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 5), (ver tabla 1).

En el caso de nuestro proyecto según la potencia a (Harvey, 1998) generar 7.5 kW se considera parte en micro centrales hidroeléctricas, sus componentes electromagnéticos serán estudiados y analizados cuando en vez de la turbina utilizaremos una bomba centrífuga la cual será acoplada al motor operando como generador para la generación de energía eléctrica.

*Tabla 1. Clasificación para pequeños aprovechamientos hidro-energéticos según la capacidad instalada y el tipo de usuario en las ZNI.*

<i>Potencia</i>	<i>Tipo</i>	<i>Usuario</i>
<i>0.5 5 KW</i>	<i>Pico central (PicoCHE)</i>	<i>Finca o similar</i>
<i>5 – 50 KW</i>	<i>Micro central (MicroCHE)</i>	<i>Caserío</i>
<i>50 – 500 KW</i>	<i>Mini central (Mini CHE)</i>	<i>Cabecera municipal</i>
<i>500 – 5000 KW</i>	<i>Pequeña central (PCH)</i>	<i>Municipio</i>

Nota: Tomando del sistema de bibliotecas OLADE.

### 2.2.3 Componentes de una Micro Central Hidroeléctrica

Según el estudio realizado por Sánchez, T. (2012), “las MCH se componen de: obras civiles, un equipo electro mecánico y redes eléctricas de transmisión y distribución”. El grafico muestra los principales componentes de una MCH.

En el caso de nuestro proyecto de investigación los componentes varían de acuerdo al diseño, equipos electromecánicos utilizados y el lugar de instalación.

#### 2.2.3.1 Obras Civiles

Está compuesta por la bocatoma, canal de conducción, desarenador, cámara de carga, tubería de presión y la casa de máquinas, entre otros.

**Bocatoma:** desvía parte del caudal de agua o rio que utilizara el grupo de generación.

**Canal de conducción:** conduce el agua desde la bocatoma hasta la cámara de carga.

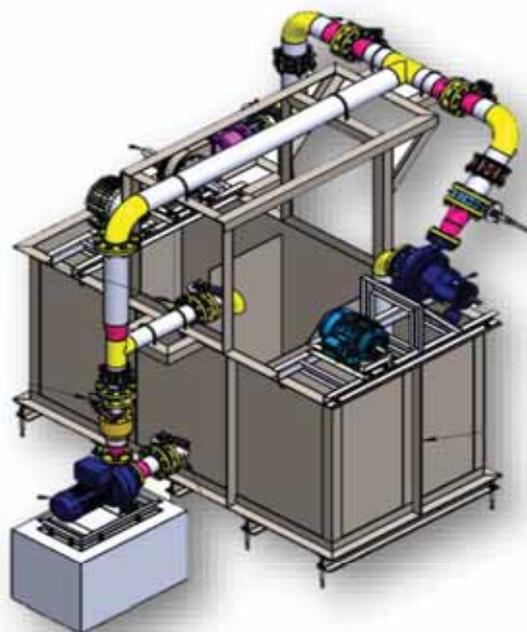
**Cámara de carga:** separa que las piedras o la arenilla que trae el agua ingresen a la tubería de presión y a la turbina.

**Tubería de presión:** es un conductor que transporta el agua desde la cámara de carga hasta la casa de máquinas.

**Casa de máquinas:** lugar adecuado para la instalación de todos los equipos de generación y control y también es un ambiente donde se ubica el canal de descarga, a través del cual se evacua el agua (Sanchez & Escobar, 2012).

#### 2.2.3.2 Equipos Electromecánico

Son todos los equipos del grupo de generación que se encuentran dentro de la casa de máquinas: turbina, generador, regulador, tablero de control y otros.



*Figura 3. Diseño y equipos electromecánicos*

Fuente: Riguel Gustin Camacho, 2020.

**Turbinas:** son máquinas transformadoras de la energía del agua en energía mecánica, en este caso el grupo convencional compuesta por la turbina Michell Banki y por otra parte el grupo no convencional utilizando una bomba centrífuga.



*Figura 4. Bomba Centrífuga*

Fuente: propia



*Figura 5. Turbina Michell Banki*

Fuente: propia.

**Generadores eléctricos:** estas máquinas reciben el giro de la turbina y transforma la energía mecánica del eje de la turbina, en energía eléctrica.



*Figura 6. Alternador Síncrono*

Fuente: propia.



*Figura 7. Motor de Inducción*

Fuente: propia.

**Reguladores y tableros de control:** son equipos o dispositivos que se encarga de mantener constante el voltaje requerido. Manteniendo constante el valor de tensión de trabajo para evitar daños a los artefactos o equipos de los usuarios (Sanchez & Escobar, 2012, págs. 6-10).



*Figura 8. Tablero de Control*

Fuente: propia

## **2.2.4 Maquinas Eléctricas Rotativas de Corriente Alterna**

### **2.2.4.1 Generalidades**

En la actualidad el creciente consumo de energía eléctrica obliga a generar e investigar más acerca de las energías renovables a fin de tener varias alternativas que ofrezcan mejores propuestas a la demanda de la población en todas partes de nuestro país. Por otra parte la dificultad del transporte de corriente continua a grandes distancias, al contrario de lo que ocurría con la alterna, en el mundo de la tecnología Pérez, S. (2009) ‘plantea un nuevo dilema, que era el de llevar a cabo el transporte de energía mediante corriente alterna y que se hacía los centros de consumo con los receptores’ que hasta el momento funcionaban con corriente continua (Perez Solis , 2009, pág. 6).

A consecuencia de brindar alternativas de solución, tenemos varios estudiosos que abren caminos hacia una solución, uno de ellos es galileo Ferrari que descubre el principio de campo magnético giratorio, el cual actualmente es de gran importancia dentro de las maquinas eléctricas de corriente alterna, además que ya Dobrowolsky o tesla posteriormente dieron aplicaciones prácticas de lo que planteo galileo.

El primer motor de inducción de corriente alterna aparece en 1889 gracias a Nicola Tesla y posteriormente a Dobrowolsky quien experimenta con un rotor de jaula de ardilla. Todo esto es gracias a la iniciativa por Ferraris en 1885 cuando realiza experimentos con corriente alternas independientes de igual intensidad y frecuencia, pero desfasados entre sí, haciéndolas circulas por devanados colocados sobre un bastidor. De esta manera comprobó que en el espacio interior de este bastidor aparecía un campo magnético rotativo que denomino campo magnético giratorio porque se desplazaba a una velocidad angular que dependía de la frecuencia de la corriente que se utilizaba para generarlo (Pérez 2009).

Partimos de aquí indicando cuán importante es el estudio de las energías renovables usando maquinas reversibles, para ello es necesario conocer todo lo necesario para poder conocer cual o como es el comportamiento de una maquina eléctrica seleccionada.

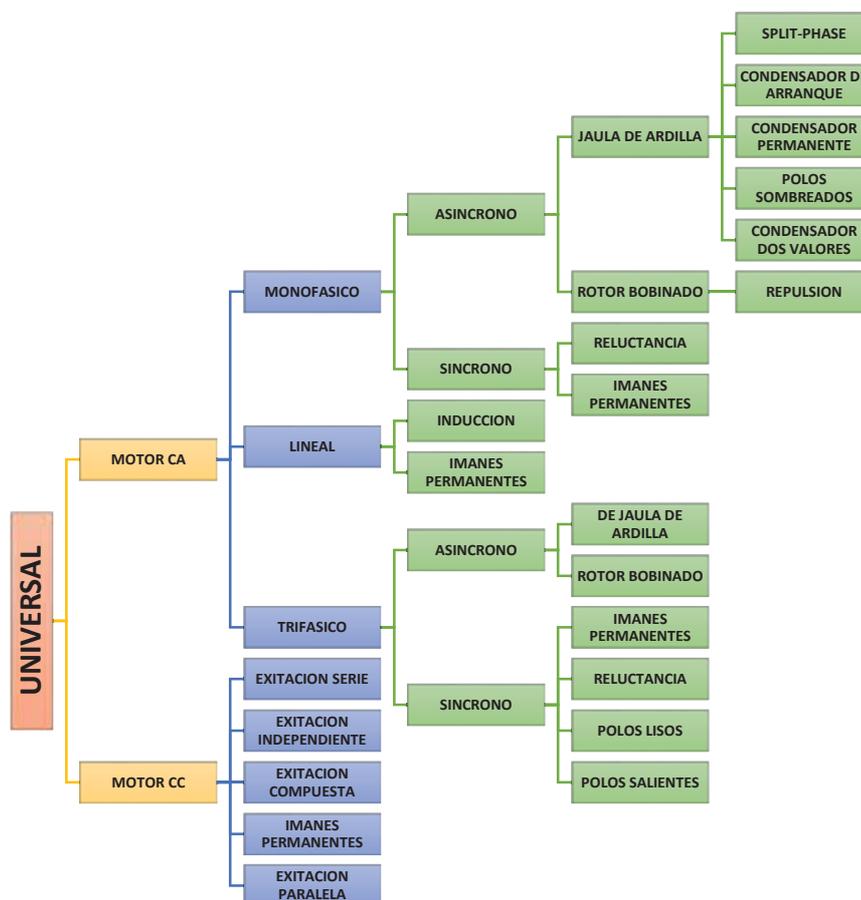


Figura 9. Diagrama de la Clasificación de Tipos de Motores más Utilizados

Fuente: (WEG, Motores, 2001, pág. 10)

La clasificación en el universo tecnológico de los motores eléctricos podemos observar de la siguiente manera los tipos de motores más utilizados. No fueron relacionados motores para usos específicos ni de aplicaciones reducidas.

Desarrollando el principio de funcionamiento de un motor de inducción en general en este capítulo se presentan el marco teórico, el marco conceptual y los principios teóricos, así como curvas del comportamiento del motor de inducción trifásico de jaula de ardilla tanto comparado al comportamiento del generador eléctrico.

#### 2.2.4.2 Marco Conceptual

El marco conceptual para el estudio del comportamiento de motor de inducción trifásico operando como generador eléctrico presenta a las siguientes actividades.

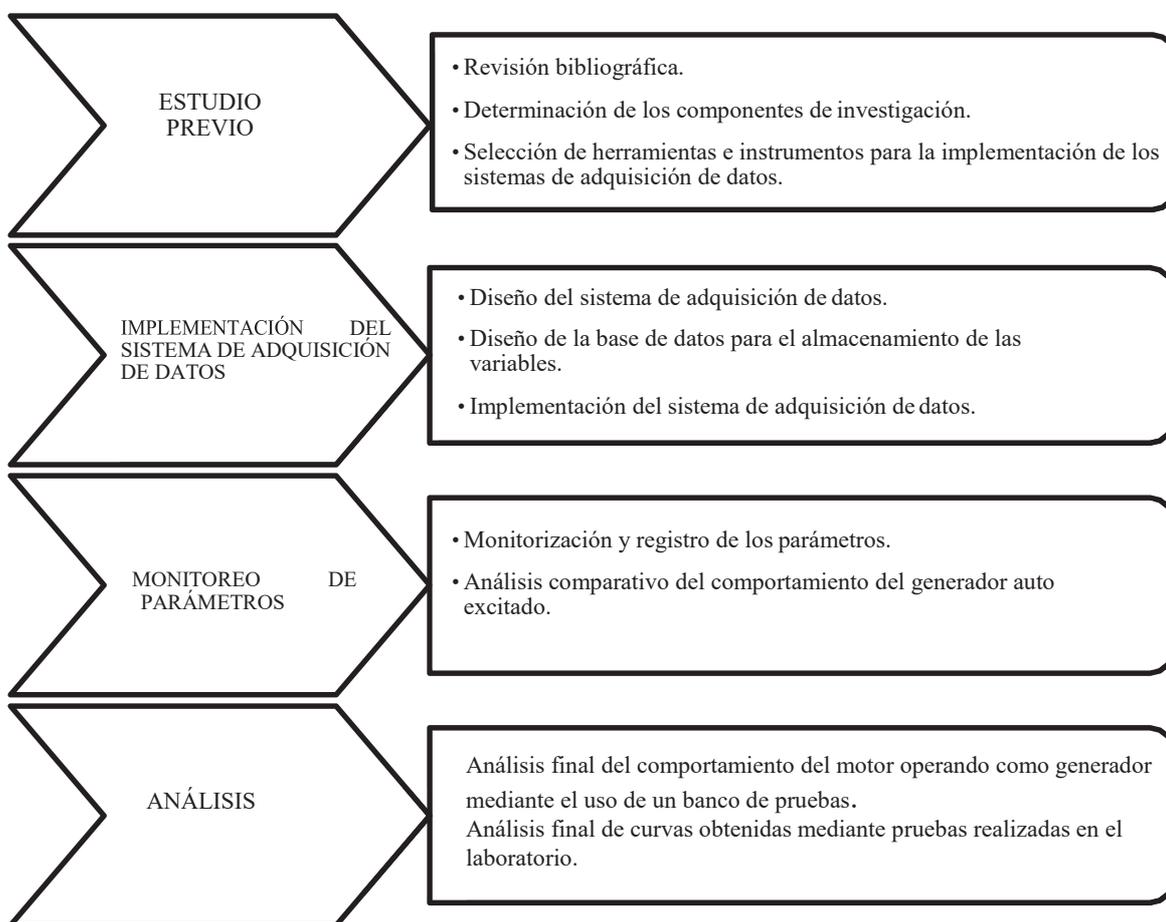


Figura 10. Secuencia Lógica de Actividades programadas durante el proceso de desarrollo.

Fuente: propia

#### 2.2.4.3 La Máquina Asíncrona

Las máquinas asíncronas son máquinas de corriente alterna donde la velocidad de giro  $N$  es diferente de la velocidad de sincronismo  $N_s$ . De esta forma podemos observar que las máquinas eléctricas puede operar y funcionar como motor así también como

generador, en la actualidad su aplicación más difundida es como motor, debido a los bajos costos, larga vida, fácil funcionamiento, entre otros, esto ha hecho que su uso en la industria sea mayor, y es más denominado como “motor de inducción”.

#### 2.2.4.4 Partes y Principios Teóricos del Motor de Inducción Trifásicos de Jaula de Ardilla

Para conocer el comportamiento de un motor de inducción trifásico de jaula de ardilla, primero es necesario tener un conocimiento previo de sus partes principales y los parámetros, del modelo de estado estacionario. En la siguiente figura 11 se observa un completo diagrama de circuito equivalente de la máquina de inducción, mostrando partes principales y representación de su circuito equivalente partiendo de su representación física.

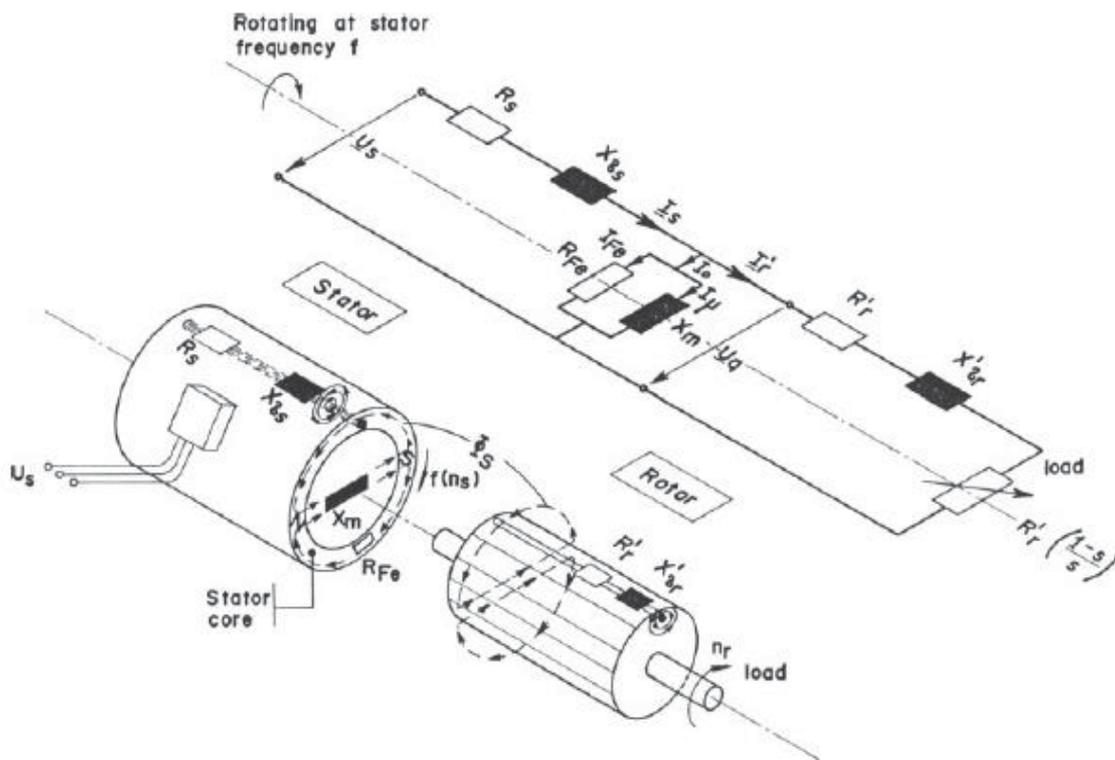


Figura 11. Diagrama de Circuito Equivalente Completo de una máquina de inducción

Fuente: (Chapallaz, Eichenberger, & Fischer, 1992, pág. 22)

También es importante conocer, clases de diseño para las maquinas eléctricas, en la figura 12 se da a conocer que indica cada clase, veamos

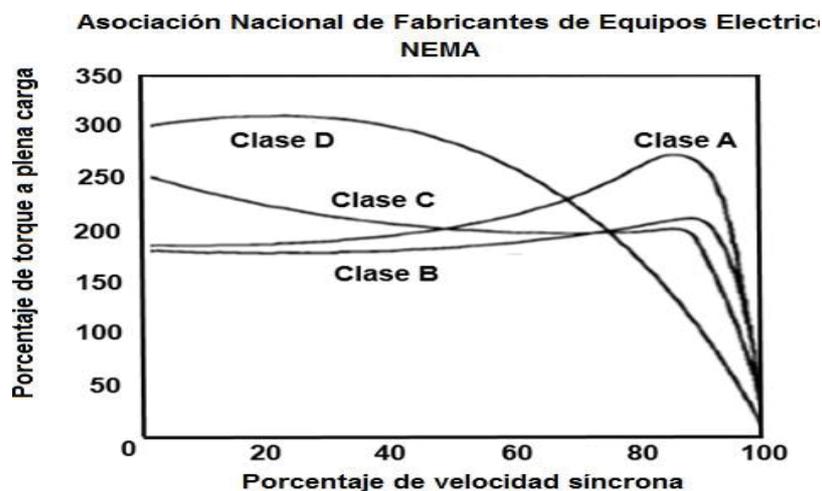


Figura 12. Clase de Diseño

Fuente: (Nema Class B, 2009, pág. 22)

El diseño clase B de un motor sirve de base para la comparación del rendimiento del motor con otros diseños. El campo de aplicación del diseño clase B es amplio, se utiliza para impulsar bombas centrífugas, ventiladores, sopladores y máquinas herramientas.

El diseño clase A de un motor tiene esencialmente las mismas características que el diseño clase B, a excepción de un torque máximo algo más alto. Sin embargo, dado que la corriente de arranque es mayor, su campo de aplicación es limitado.

El diseño clase C de un motor tiene un torque de arranque más alto, pero tiene un torque máximo menor que el diseño clase B. El torque de arranque más alto lo hace adecuado para impulsar bombas de émbolo, pantallas vibradoras y compresores sin dispositivos de carga. La corriente de arranque y el deslizamiento a torque nominal son esencialmente los mismos que para el diseño clase B.

El diseño de clase D de un motor tiene un torque de rotor bloqueado muy alto y un alto deslizamiento. Su principal campo de aplicación se encuentra en cargas de alta inercia tales como prensas, punzadores con volantes, elevadores y polipastos.

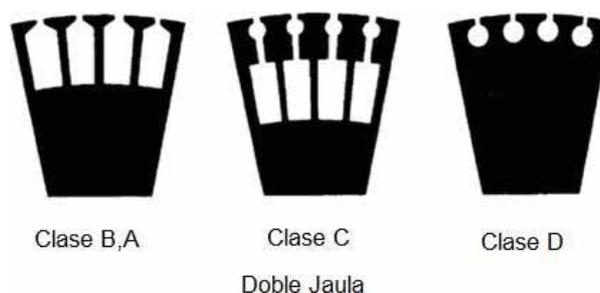


Figura 13. Forma del Rotor según la Norma NEMA

Fuente: (Nema Class B, 2009, pág. 22)

*Tabla 2. Norma NEMA de las características de diseño para varios Torques para aplicaciones a diferentes cargas.*

Diseño NEMA	Torque de arranque	Corriente de Arranque	Torque Mínimo	Deslizamiento o a plena carga	Aplicaciones típicas
A	Normal	Alto	Alto	Bajo	Máquinas, herramientas, ventiladores
B	Normal	Normal	Normal	Normal	Industrial
C	Alto	Normal	Normal	Normal	Carga como compresor, Carga como cinta transportadora
D	Muy alto	Bajo		Alto	Prensa, perforadora o polipasto

Tomando del sistema de bibliotecas:(Fuente: (Say, 1970, pág. 665)

Curva típica torque vs velocidad.

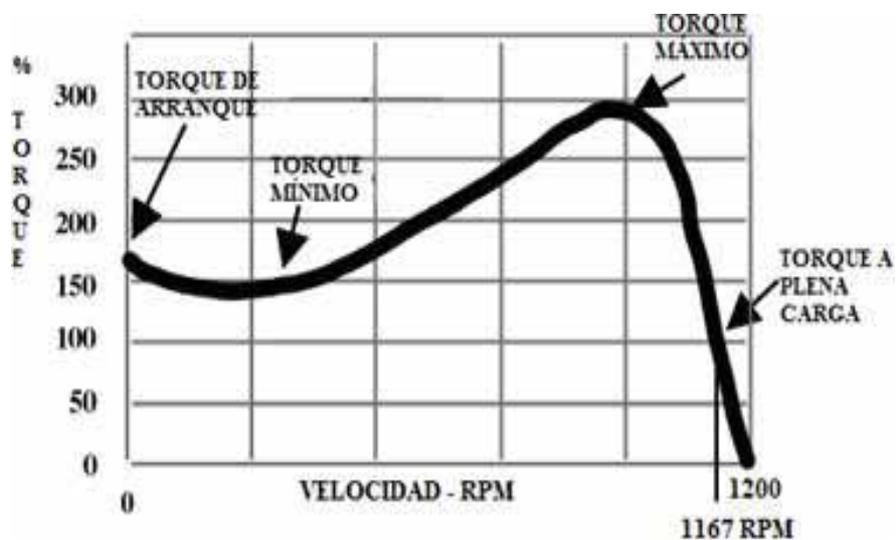


Figura 14. Curva típica Torque vs Velocidad según Norma NEMA

Fuente: (Nema Class B, 2009, pág. 22)

### 2.2.4.5 Clasificación del Motor según Norma Nema

En la figura 15 se muestra las clases A, B, C y D, de los motores según la norma NEMA y sus tendencias del par con el deslizamiento.

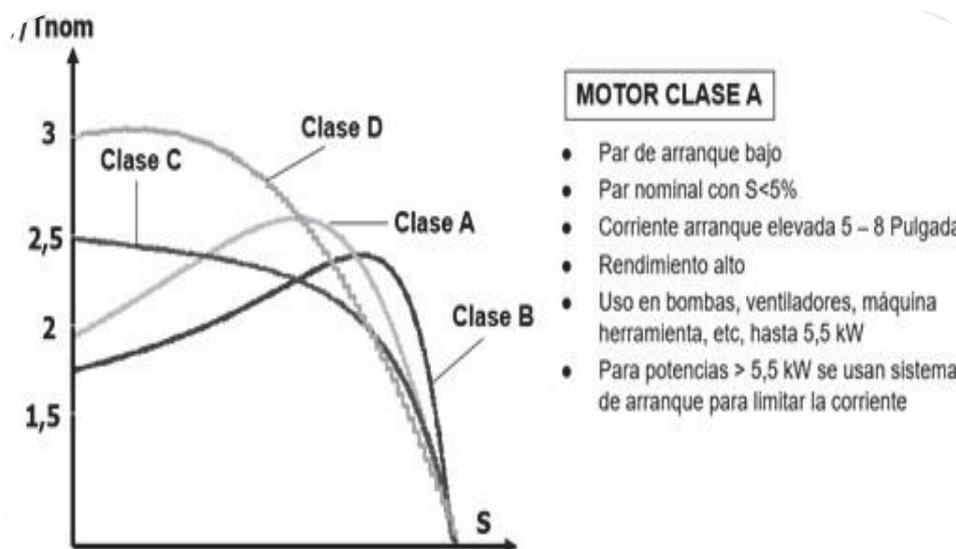


Figura 15. Clasificación del motor según norma NEMA

Fuente: (Nema Class B, 2009, pág. 23)

### 2.2.4.6 Principales Características según la Norma NEMA

En la figura 16 se muestran las clases B, C y D según las normas NEMA, de los principales indicadores de un motor de inducción.

<p><b>MOTOR CLASE B</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Par arranque similar clase A</li> <li>• Corriente arranque <math>25\% &lt;</math> clase A</li> <li>• Par nominal con <math>S &lt; 5\%</math></li> <li>• Rendimiento Alto</li> <li>• Aplicaciones similares al clase A pero con <math>&lt; 1</math> arranque</li> <li>• Son los más utilizados</li> </ul>	<p><b>MOTOR CLASE C (Doble jaula)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Par arranque elevado (2 veces <math>T_{nom}</math> aprox.)</li> <li>• Corriente de arranque baja</li> <li>• Par nominal con <math>S &lt; 5\%</math></li> <li>• Rendimiento Alto</li> <li>• Aplicaciones que requieren alto par de arranque</li> <li>• <math>T_{max} &lt;</math> clase A</li> </ul>
<p><b>MOTOR CLASE D</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Par arranque muy elevado (<math>&gt; 3 T_{nom}</math>)</li> <li>• Corriente de arranque baja</li> <li>• Par nominal con <math>S</math> elevado (7 –17%)</li> <li>• Rendimiento bajo</li> <li>• Aplicación en accionamientos intermitentes que requieren acelerar muy rápido</li> </ul>	

Figura 16. Fuente: (Nema Class B, 2009, pág. 23)

Fuente: Nema Class B, Squirrel – cage Type, (2009). Design of Induction Motor. PP 22

### 2.2.4.7 Aplicaciones habituales de los motores de inducción

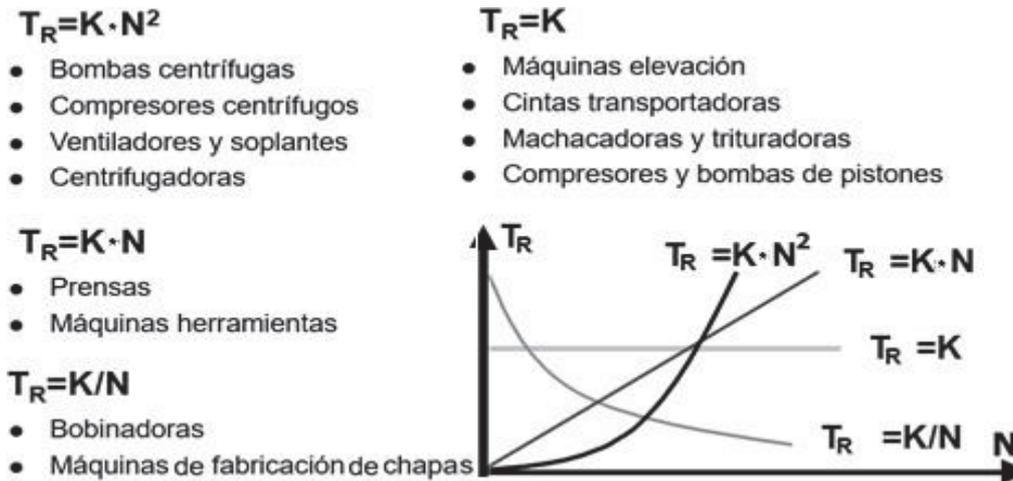


Figura 17. Aplicaciones más habituales de los motores de inducción

Fuente: Universidad de Tarapacá, (2010). Departamento de Ingeniería Electrónica. PP 130

En la figura 17 se muestran las aplicaciones más usadas según el tipo de carga para la variación del par de los motores de inducción.

### 2.2.4.8 Partes Principales del Motor de Inducción

En las figuras 18, 19, 20 observamos las partes constructivas del motor WEG así también aspectos constructivos para cada tipo de devanado como motores de inducciones trifásicos de jaula de ardilla y rotor bobinado con sus partes principales que son el estator y rotor.



Figura 18. Estator del Motor de Inducción Jaula de Ardilla

Fuente: propia



Figura 19. Rotor del Motor de Inducción Jaula de Ardilla

Fuente: propia.

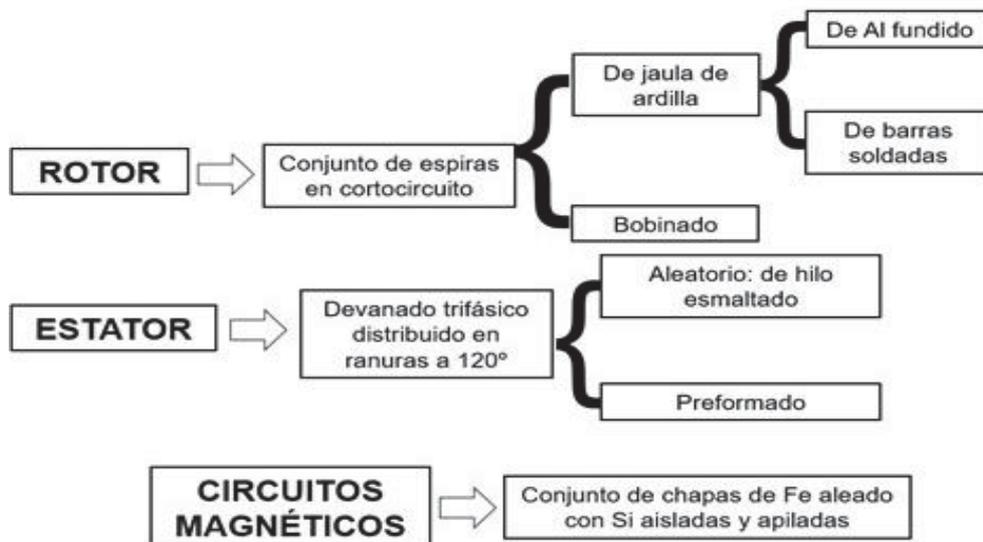


Figura 20. Partes principales del motor

Fuente: Universidad de Tarapacá, (2010). Departamento de Ingeniería Electrónica. PP 130

#### 2.2.4.9 Circuito Equivalente del Motor de Inducción

En la figura 21 se muestra el circuito T equivalente por fase del motor de inducción trifásico con sus principales parámetros.

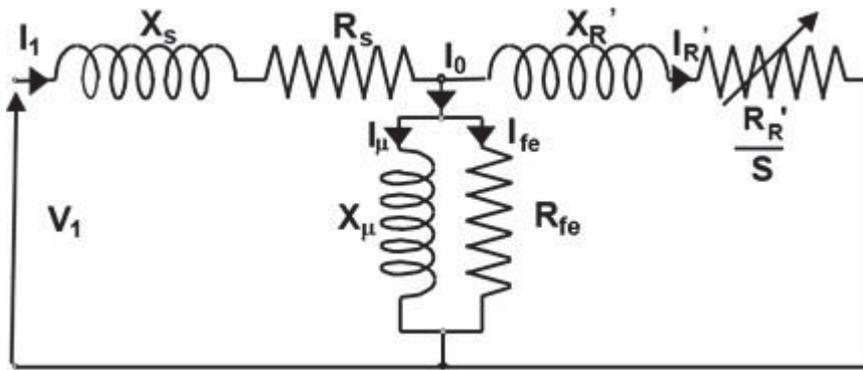


Figura 21. Circuito equivalente por fase del motor de inducción

Fuente: (Fitzgerald, K, Jr, Umans, & S.D, 2004, pág. 682)

#### 2.2.4.10 Circuito Equivalente Referido al Estator del Motor de Inducción

En la figura 22 se muestra el circuito T equivalente del motor de inducción trifásico con sus principales parámetros referidos al estator, donde se visualiza las reactancias, resistencias, corrientes respectivas.

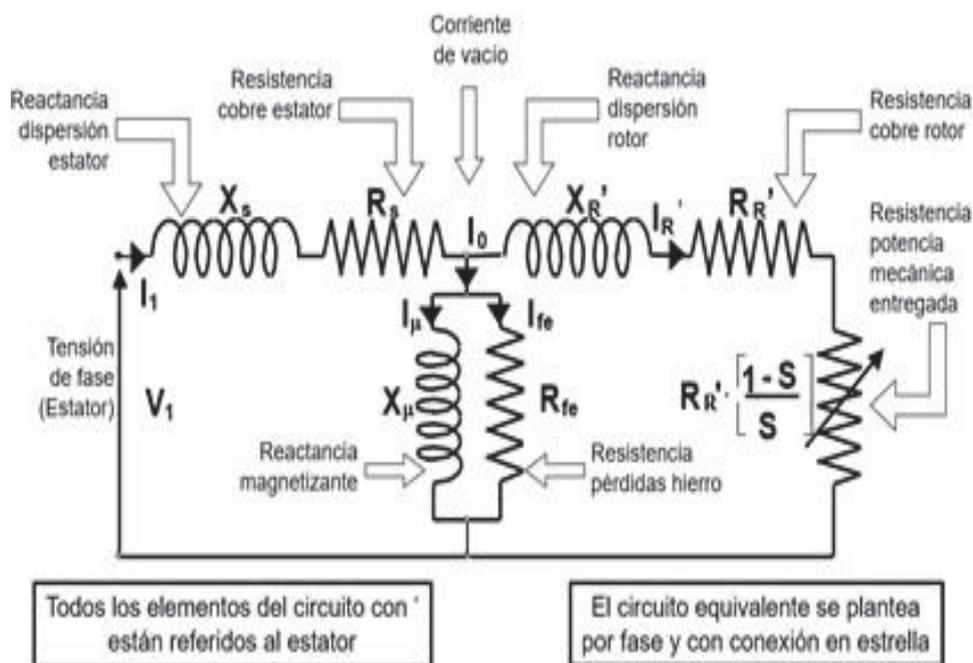


Figura 22. Circuito equivalente referido al estator

Fuente: (Fitzgerald, K, Jr, Umans, & S.D, 2004, pág. 682)

#### 2.2.4.11 Potencias, Torques y Pérdidas del Motor de Inducción

En la figura 23 se muestran fórmulas que indican: ( $P_m$ ): potencia mecánica de salida del motor. ( $SP_g$ ): potencia de entrada al rotor que es igual a la potencia de salida del estator. ( $P_g$ ): Potencia en el entrehierro. ( $\Omega$ ): Velocidad angular del rotor. ( $\Omega_s$ ): Velocidad

angular de sincronismo. (S): Deslizamiento a plena carga. (Ti): Par interno desarrollado por la máquina.



Figura 23. Fórmulas de las potencias, torques y pérdidas del motor

Fuente: (Veinott., C., & G., 1953, pág. 6)

### 2.2.4.12 Circuito Equivalente Thévenin del Motor de Inducción

En la figura 24 se pueden mostrar las ecuaciones de la tensión de Thévenin equivalente y la impedancia de Thévenin entre los puntos A y B, utilizado para calcular el par electromagnético de la máquina.

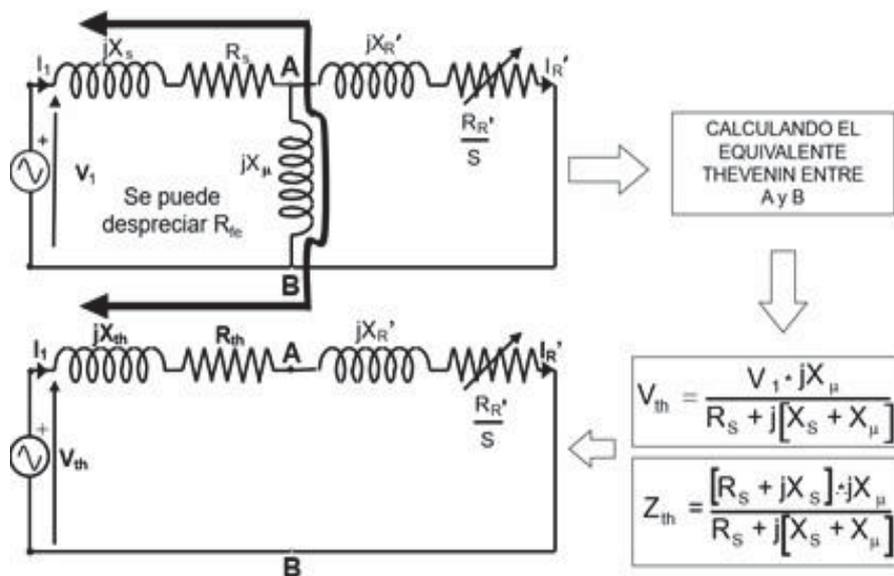


Figura 24. Circuito equivalente Thévenin del motor

Fuente: (Fitzgerald, K, Jr, Umans, & S.D, 2004, pág. 683)

### 2.2.4.13 Circuito equivalente Thévenin para el cálculo del Par

En la figura 25 nos muestra las ecuaciones de la corriente en el rotor y el torque electromagnético del motor usando el circuito Thévenin equivalente.

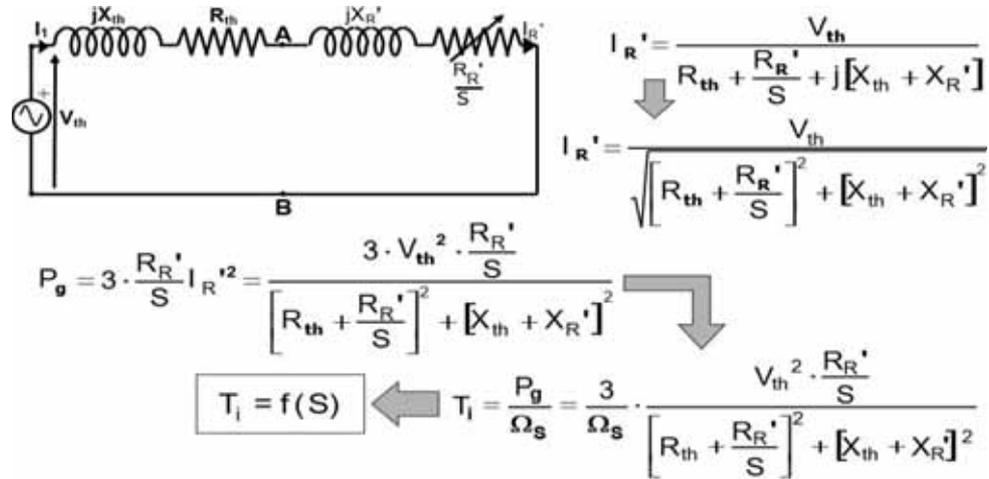


Figura 25. Circuito equivalente Thévenin para el cálculo del par de la máquina.

Fuente: (Fitzgerald, K, Jr, Umans, & S.D, 2004, pág. 682)

En la figura 26 se muestra la ecuación de deslizamiento máximo para el torque máximo, usando el teorema de la máxima transferencia de potencia.

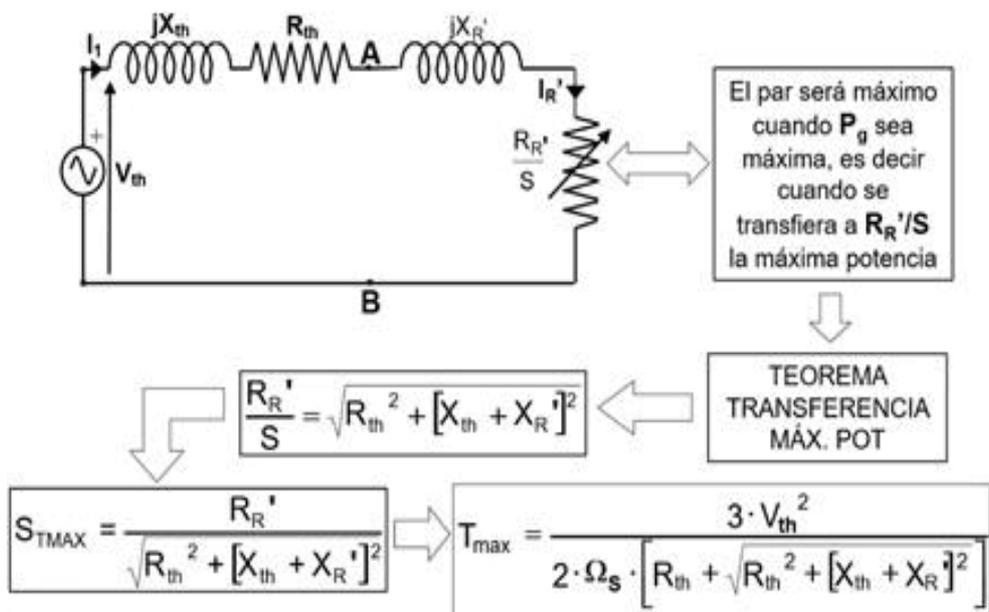


Figura 26. Circuito equivalente del motor de inducción.

Fuente (Veinott., C., & G., 1953, pág. 6)

**2.2.4.14 Par versus deslizamiento**

En la figura 27 se muestra la curva del torque con el deslizamiento para operación como motor, generador y freno. Se puede ver los diferentes tipos de par, tales como “Par de Arranque”, “Par Máximo” y “Par Nominal”.

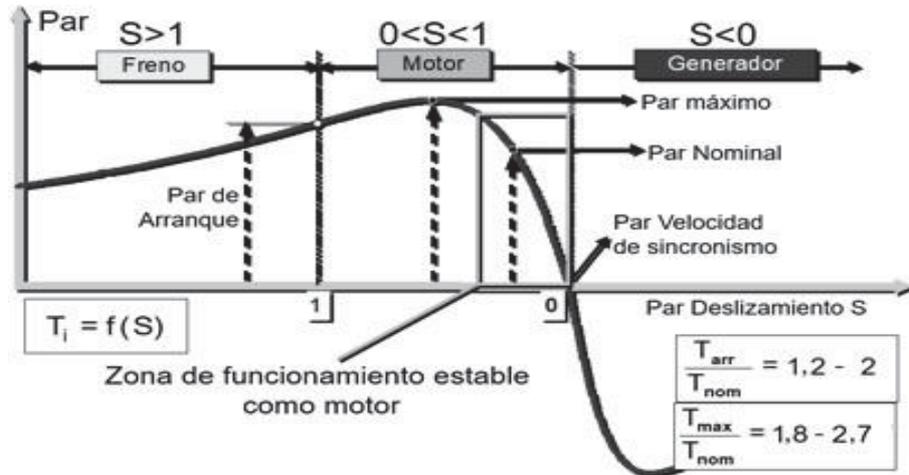


Figura 27. Par versus deslizamiento.

Fuente: (Alger, P., & Ku, 1954, pág. 6).

**2.2.4.15 Par versus deslizamiento para una resistencia retórica**

En la figura 28 se muestra la ecuación del par máximo independiente de la resistencia retórica. En la ecuación del deslizamiento máximo si depende de la resistencia retórica.

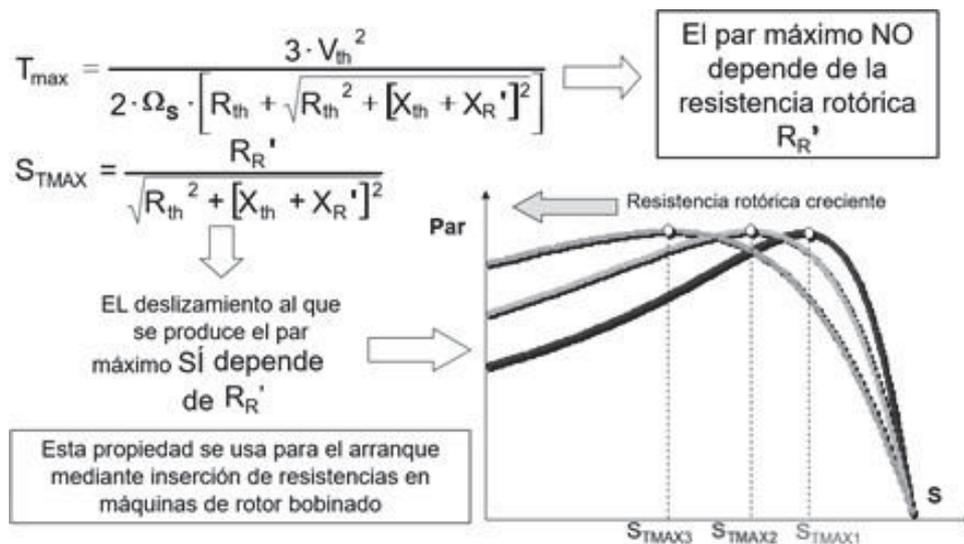


Figura 28. Par versus deslizamiento para una resistencia retórica.

Fuente: (Alger, P., & Ku, 1954, pág. 6)

### 2.2.4.16 Par versus deslizamiento máximo

En la figura 29 se muestra la tendencia del par conforme varia la resistencia rotórica.

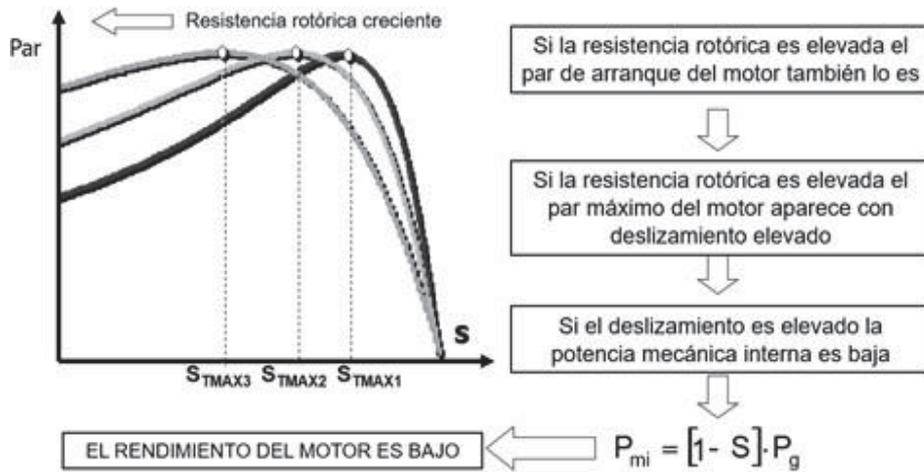


Figura 29. Curva del Par versus deslizamiento máximo

Fuente: (Alger, P., & Ku, 1954, pág. 6)

### 2.2.4.17 Tipo de ranuras del rotor

En la figura 30 se muestran los tipos de jaula de ardilla y sus efectos de la geometría y cómo influyen en la variación de giro del motor.

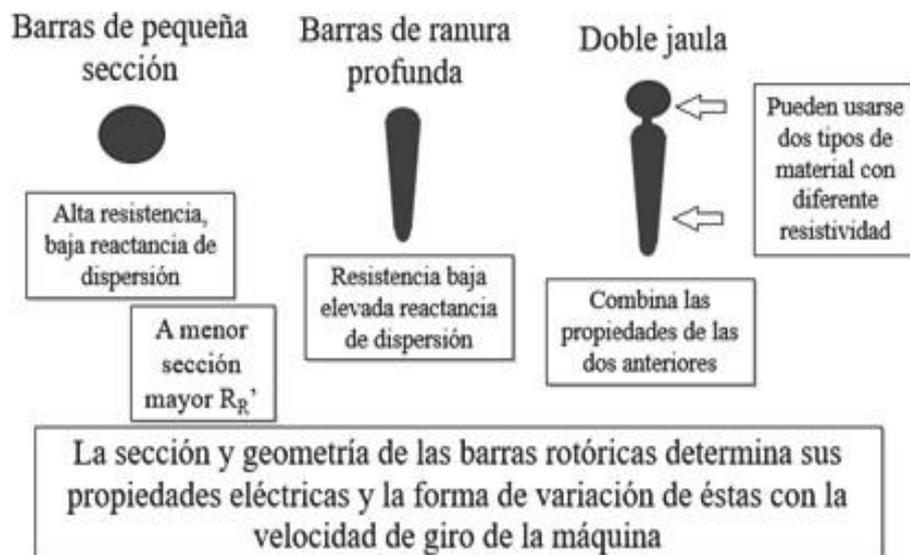


Figura 30. Tipo de ranuras del rotor.

Fuente: (Veinott., C., & G., 1953, pág. 6)

### 2.2.4.18 Régimen de funcionamiento de la Máquina de Inducción.

Rodríguez (como se citó en Ortiz, 2011) piensa que la (transición entre el funcionamiento de la máquina de inducción como motor o como generador es función del deslizamiento). Según esta definición se puede distinguir en qué modo está operando la máquina, por otra parte, definiendo el deslizamiento podemos indicar que es el cociente de la diferencia entre la velocidad síncrona del campo magnético de las corrientes del estator y la velocidad del campo magnético de las corrientes en el rotor, este dato podemos obtenerla a partir de la placa de características de la máquina y también podemos decir que esta velocidad es la que el campo magnético principal corta a los conductores del rotor.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

$S$ =deslizamiento,  $n_s$  =velocidad síncrona y  $n_r$  =velocidad del rotor.

Según la diferencia de estas velocidades de rotación, las máquinas de inducción pueden trabajar en tres modos de operación: como generador, motor y freno electromagnético. Para nuestro trabajo se considera ver el comportamiento de la máquina de inducción operando como generador MAG, ya que así estaríamos alcanzando los objetivos de la tesis.

### 2.2.4.19 Máquina de inducción en régimen de generador.

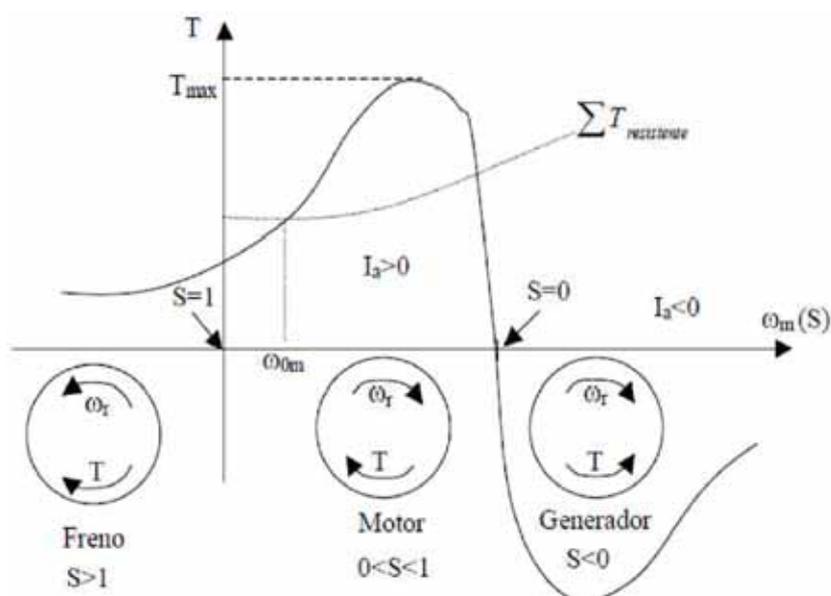


Figura 31. Representación de las características de una máquina

Se puede ver que la máquina presenta tres características claramente definidas, las cuales son:

- motor: el deslizamiento está entre 0 y 1, esto indica que la velocidad como el torque serán positivos y presentarán el mismo sentido de giro.
- generador: el deslizamiento es negativo, esto indica que el torque es negativo de tal forma que la potencia será negativa, mientras que la velocidad será positiva.
- freno: el deslizamiento es mayor que 1, entonces el torque es positivo pero la velocidad es negativa, esta es la razón por lo que se le conoce como freno.
- finalmente, observamos en la figura que, además de presentar el torque, muestra la potencia y la corriente del estator. Además, se observa y se aprecia que la potencia no es simétrica, puesto que, vemos la curva que entrega en el régimen de generador.

### **2.2.5 Importancia de los grupos de generación con máquinas reversibles.**

Promover el uso de pequeños recursos hidroeléctricos que cuentan cada lugar, sería posible en la medida en que los costos de los equipos electromecánicos se lograran disminuir, debido a una producción nacional continua que cubra una gran gama considerable, tal que se ajuste a diferentes condiciones de altura y caudal para diferentes potencias; esto hará que tengamos varias alternativas que ofrecer tanto en el costo del kilowatt instalado y en el costo kilowatt generado. Una solución de alternativa es utilizar bombas como turbinas, las cuales tienen una producción industrial que cubre una gran gama de caudales y alturas, y en calidad de generadores utilizar motores de inducción que dentro de nuestro país cuenta con disponibilidad de máquinas y repuestos de construcción (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, págs. 5-6)

Esta alternativa de solución permite también técnicamente suministrar energía eléctrica a comunidades rurales aisladas con bajos recursos económicos, además se caracteriza por los costos de kilowatt instalado y generado que son menores que el de una solución convencional turbina generador.

Por tal motivo se debe implementar el uso de estos grupos de generación de energía poco a poco teniendo en cuenta las fortalezas que apoyan a la motivación de su uso.

### **2.2.6 Importancia de Grupos de Generación Hidroeléctrica Aislada**

Las grandes Centrales hidroeléctricas convencionales producen energía eléctrica suficiente para abastecer a grandes ciudades y a redes extensas, un sistema de generación a gran escala produce por lo general, más de 10 MW de potencia.

Según Ramiro Flores Las pequeñas centrales eléctricas son una pequeña contribución en el suministro a la red, pero los sistemas de micro generación denominadas (micro CHE), son aún más pequeños y por lo general no suministran energía eléctrica a las redes nacionales. Se usan en zonas alejadas donde no llega la red y en algunos casos proveen de electricidad a pequeñas industrias y/o comunidades rurales. (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 7).

En muchos países hay una necesidad creciente de suministros de energía para las zonas alejadas, zonas rurales, tanto para el abastecimiento de electricidad como para el apoyo a la industria y las autoridades gubernamentales se enfrentan a los elevadísimos costos de la extensión de las redes de electricidad, costos mayores en instalación con sistemas convencionales de generación de energía eléctrica. Con frecuencia la micro generación constituye una alternativa económica, pues con los grupos de generación aisladas e independientes se ahorra el costo de las líneas de transmisión que están dotados de equipos muy costosos, además de los costos de personal entre otros que son parte de su instalación y operación. (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 7).

Mas, al contrario, los sistemas de micro hidro generación no convencionales pueden ser diseñados y construidos por personal local y organizaciones más pequeñas cumpliendo con requisitos menos estrictos y usando componentes y maquinaria fabricados localmente. (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 7).

### **2.2.7 Regulación de Tensión y Frecuencia en Grupos de Generación Hidroeléctricas Aisladas**

En grupos de generación de pequeñas potencias se presentan desventajas del control de la tensión y frecuencia generada ya que no hay elementos que regulen, debido a que casi continuo se producen variaciones de caudal y de cargas importantes, esto varia la velocidad de rotación del grupo turbina-generator, ya que esta depende del equilibrio entre la potencia hidráulica que entra a la turbina y la potencia eléctrica producida por el generador, frente a las presentes desventajas se da alternativas de solución para así mejorar la generación de energía eléctrica con nuestro grupo de generación no convencional (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, págs. 8-11).

las diferencias de valores de velocidades en la operación del grupo no convencional, se traducen en variaciones de tensión y frecuencia a la salida del MAG.

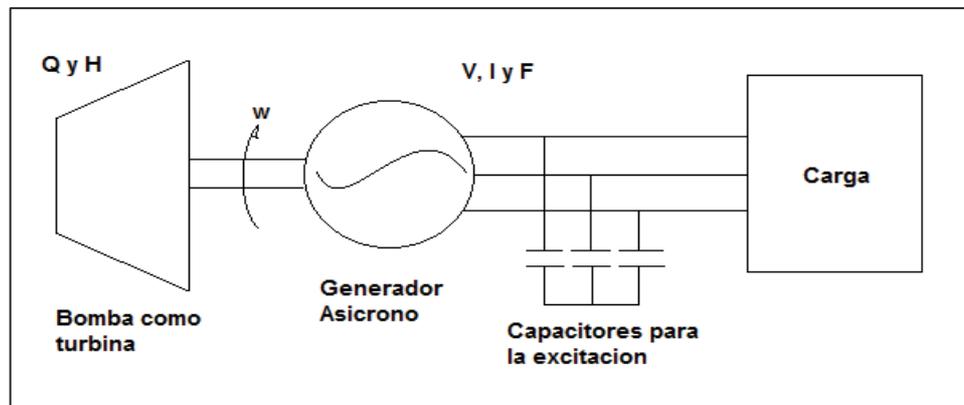


Figura 32. Grupo de Generación no convencional aislada.

Fuente: (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 8)

### 2.2.8 Posibles Aplicaciones de Motores de Inducción como Generadores.

En la figura 33 se muestra varios campos de aplicaciones y combinaciones de máquinas de inducción utilizadas como generadores en micro centrales hidroeléctricas. Obviamente, una máquina de inducción se puede utilizar prácticamente en todas las aplicaciones posibles del campo de la micro central hidroeléctrica. Sin embargo, algunas aplicaciones combinaciones son más favorables que otras, ya sea por limitaciones técnicas o económicas. En las siguientes secciones, daremos una descripción general de las ventajas y desventajas del motor de inducción como generador en varias aplicaciones, principalmente en comparación con el generador síncrono (Chapallaz, Eichenberger, & Fischer, 1992, pág. 8).

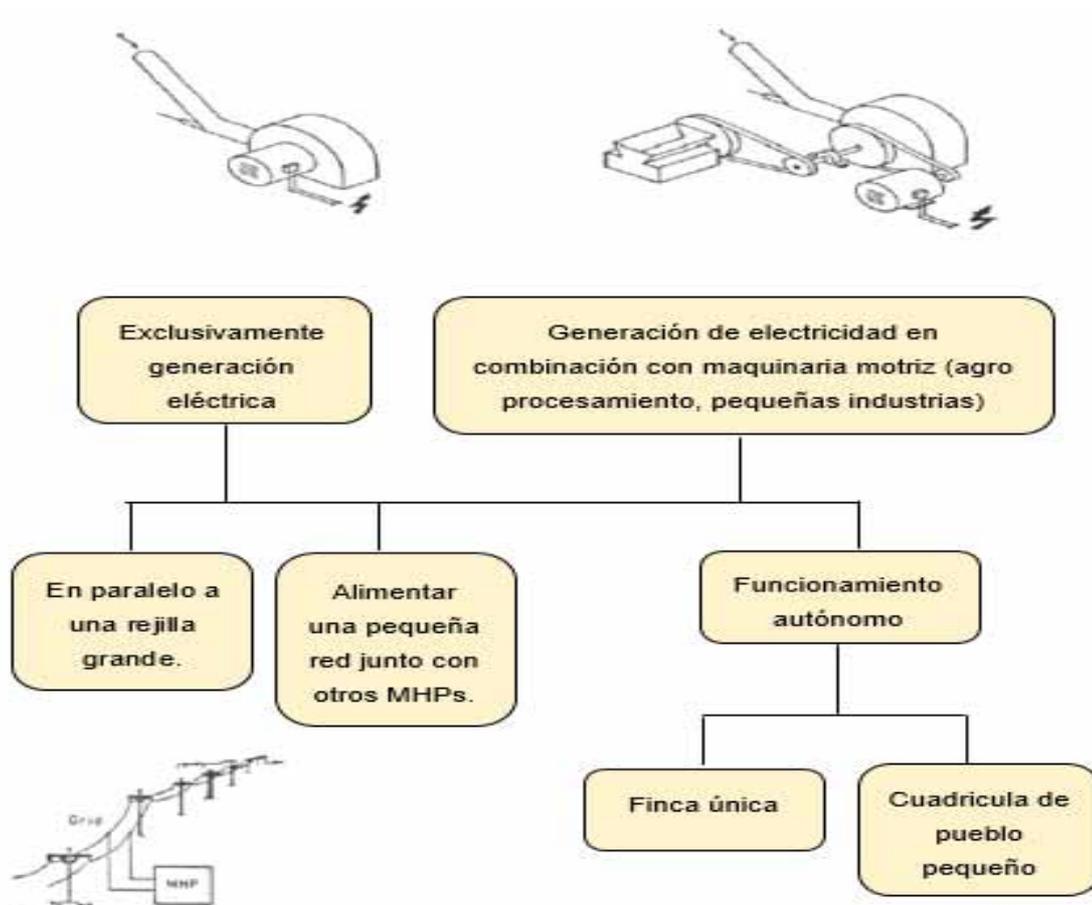


Figura 33. posibles aplicaciones de motores de inducción como generadores en micro centrales hidroeléctricas

Fuente: (Chapallaz, Eichenberger, & Fischer, 1992, pág. 9).

## 2.2.9 Ventajas de los Motores de Inducción como Generadores.

*Tabla 3. Ventajas del uso del Generador de Inducción*

<b>CRITERIOS</b>	<b>GENERADOR DE INDUCCIÓN</b>	<b>GENERADOR SÍNCRONO</b>
<b>costos de inversión</b>	para un rango de potencias más bajo (hasta 30kVA) ventaja considerable	para rangos de potencia media (más de 100kVA) competitivo porque los motores de inducción de este rango ya no están ampliamente disponibles.
<b>disponibilidad de máquinas y repuestos</b>	fácil disponibilidad, debido al uso generalizado de motores de inducción en la agricultura y la industria.	no disponible en países en desarrollo debido al pequeño mercado, puede tener que ser importado.
<b>construcción</b>	robusto y simple, asegurando confiabilidad y bajos costos de mantenimiento	el excitador de CC, las escobillas y el anillo rozante, los devanados del rotor aislados más el AVR hacen que el generador síncrono sea más susceptible a averías y mayores costos de mantenimiento y reparación.
<b>sincronizando para operación en paralelo</b>	no requiere sincronización, el interruptor principal simplemente se cierra cerca de la velocidad síncrona.	requiere equipo de sincronización (sin cronoscopio o lámparas)
<b>governador de control de velocidad para operación aislada</b>	un equipo relativamente simple es suficiente en la mayoría de los casos, por ejemplo, IGC que controla el voltaje ya que la frecuencia no varía excesivamente debido a la saturación de los motores de inducción.	los generadores síncronos generalmente requieren control tanto de voltaje (AVR) como de frecuencia, en la generación el electricidad autónoma y desatendida.
<b>capacidad de sobre velocidad</b>	lo motores de 4 o más polos suelen tener el doble de velocidad nominal, las máquinas de 2 polos pueden tener capacidades de sobre velocidades más limitadas.	capacidades de sobre velocidad requeridas en conjunto con turbinas solo bajo pedido

Fuente: (Chapallaz, Eichenberger, & Fischer, 1992, pág. 9).

## CAPITULO III

### 3 MODELAMIENTO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MOTOR OPERANDO COMO GENERADOR

#### 3.1 Introducción

En el presente trabajo se tiene el capítulo 3 donde se desarrolla el modelamiento de los parámetros eléctricos de motor de inducción jaula de ardilla seleccionada para operación como turbina.

Dentro del desarrollo de capítulo contiene el cálculo de los parámetros eléctricos del motor como generador a partir de los datos de la placa de características, así mismo se desarrolla el cálculo del valor del banco de capacitores mediante varios métodos de donde se evalúa, se analiza los resultados obtenidos y se selecciona el valor del capacitor a usar para la autoexcitación del motor de inducción para su operación como motor.

Finalmente, con los valores de los parámetros eléctricos calculados y valores del banco de capacitores se realiza un análisis mediante la simulación de tales resultados en Matlab observando en cada figura el resultado y evaluando si es favorable.

#### 3.2 Clasificación de los Motores de Inducción.

Existen diferentes tipos de motores de inducción con diferentes características constructivas y operativas, distintas potencias, eficiencia, etc. Diseñados para realizar múltiples funciones en la industria.

- IEC Comisión Internacional de Electrotecnia.
- NEMA Asociación Norteamericana de Manufacturas Eléctricas.

Estos organismos y otros promueven la conectividad de sus compañías socias, establecen normas internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y otras relacionadas, con el fin de estandarizar los equipos y máquinas eléctricas, por lo tanto, pretende clasificar los motores de inducción organizándolos según las normatividades.

Más adelante con los datos de la placa de características podremos ubicar a nuestro motor eléctrico con lo que viene por fábrica, según las normas que utilizaron para su construcción, y que también será necesario tomar muy en cuenta para modelar y hacer algunos cambios para su operación y hacer operar como deseamos en este proyecto, de aquí veremos el comportamiento del generador de inducción con las implementaciones realizadas.

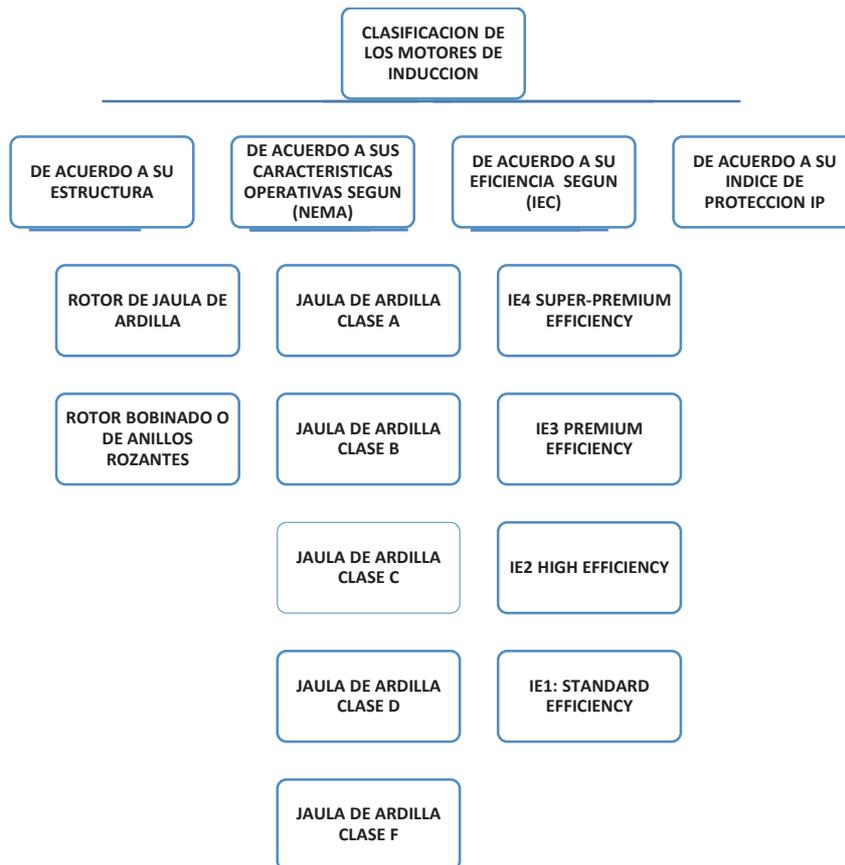


Figura 34. Clasificación de los motores de inducción según las normas NEMA, IEC.

Fuente: propia.

Los datos o variables identificativos con la que cuenta su placa de características del motor nos ayudan a identificarle mejor y estos se pueden subdividir en varios grupos, unos de carácter térmicos, otros de carácter mecánico o de aplicación, otros de tipo eléctricos, aparte de que también muestra otros indicativos de la parte normativa a la que se encuentran sujetos, otros relativos a los aspectos constructivos y a la serie de fabricación (Pineda, 2010). En nuestro estudio nos interesan fundamentalmente los de carácter eléctrico.

Nuestro MAG es modelado tomando muy en cuenta la placa de características de la cual algunos datos son utilizados para su implementación con un banco de capacitores para su excitación proporcionando potencia reactiva, otros datos que presenta para el modelamiento y todo dato es muy importante tomar en cuenta para ser probado como MAG en un banco de pruebas donde será analizado su comportamiento.

En la tabla 4 se muestra la clasificación de los motores de inducción, podemos observar también que la parte seleccionada es la parte que le corresponde a nuestro generador de inducción según corresponde por su placa de características.

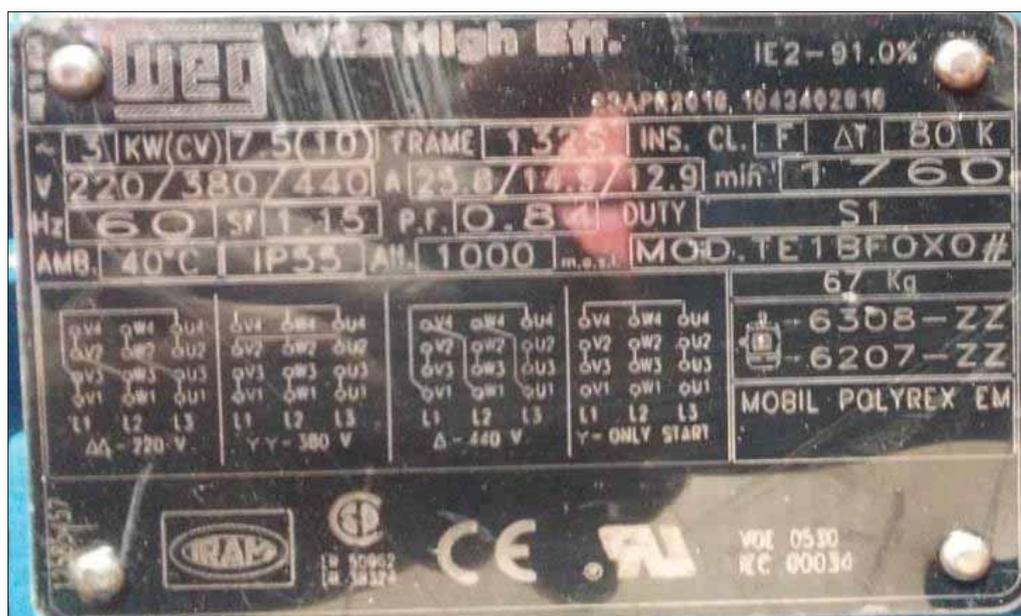


Figura 35. Placa de características de motor jaula de ardilla WEG.

Fuente: propia

Tabla 4. Clasificación de los motores de inducción según su eficiencia.

IEC/EN 60034-30-1	EQUIVALENCIAS		DETALLE
	EU MEPS	EISA USEEV CANADA	
<b>IE4:Super Efficiency</b>	<b>Premium</b>		La eficiencia se presentó únicamente en un anexo informativo
<b>IE3:Premium Efficiency</b>	IE3	Premium	Eficiencia Premium (16-20% menos pérdidas que IE2)
<b>IE2:High Efficiency</b>	IE2:High Efficiency	Energy Efficiency/ EPACKT	Eficiencia alta (eff1, EAPAct)
<b>IE1:Estándar Efficiency</b>		Below Standard Efficiency	Eficiencia estándar (eff2)

Nota: tomando del sistema de bibliotecas IEC/EN 60034-30.

En la tabla 5 y tabla 6 se muestra el grado de protección indicada por la cifra características con el que viene de fábrica y se muestra en la placa de características del motor.

Tabla 5. Grado de protección según a la primera cifra característica

IEERA CIFRA	GRADOS DE PROTECCIÓN	
	Protección contra contactos directos. (caja de bornes)	Protección contra la penetración de cuerpos sólidos extraños. (ventilador)

<b>0</b>	Sin protección	Sin protección
<b>1</b>	Protección contra el acceso a partes peligrosas con el dorso de la mano	Protección contra los cuerpos solidos extraños de diámetro superior a 50mm
<b>2</b>	Protección contra el acceso a partes peligrosas con un dedo, $\varnothing \geq 12\text{mm}$ y 80mm de longitud	Protección contra los cuerpos solidos extraños de diámetro superior a 12,5mm
<b>3</b>	Protección contra el acceso a partes peligrosas con una herramienta, $\varnothing \geq 2,5\text{mm}$	Protección contra los cuerpos solidos extraños de diámetro superior a 2,5 mm
<b>4</b>	Protección contra el acceso a partes peligrosas con un alambre de $\varnothing \geq 1\text{mm}$	Protección contra los cuerpos solidos extraños de diámetro superior a 1 mm
<b>5</b>	Protección contra el acceso a partes peligrosas con un alambre de $\varnothing \geq 1\text{mm}$	Protección contra polvo. Puede penetrar polvo en cantidad no perjudicial
<b>6</b>	Protección contra el acceso a partes peligrosas con un alambre de $\varnothing \geq 1\text{mm}$	protección contra el polvo. Estancas al polvo.

Nota: tomando del sistema de bibliotecas, acorde a DIN EN IEC 60529.

La indicación dada por la primera cifra implica la conformidad del producto a todos los grados inferiores.

En la siguiente tabla 6 se muestra el grado de protección indicada por la segunda cifra características extraídas de la placa de características del motor.

*Tabla 6. Grado de protección según a la segunda cifra característica*

<b>2DA CIFRA</b>	<b>GRADO DE PROTECCIÓN</b>	
	DESCRIPCIÓN ABREVIADA	PROTECCIÓN PROPORCIONADA POR LA ENVOLVENTE
<b>0</b>	Sin protección	Sin protección
<b>1</b>	Protección contra la caída vertical de gotas de agua.	A la caída vertical de gotas de agua
<b>2</b>	Protección contra las caídas de agua verticales con un mayor caudal y con una inclinación de hasta 15°	A la caída vertical de gotas
<b>3</b>	Protección contra el agua en forma de lluvia	A la caída de agua en forma de lluvia fina, en una dirección que tenga, respecto a los dos lados de la vertical un ángulo inferior o igual a 60°
<b>4</b>	Protección contra las proyecciones de agua	A la proyección de agua en todas las direcciones sobre la envolvente.
<b>5</b>	Protección contra chorros de agua	A la proyección de agua a chorros fuertes sobre la envolvente en cualquier dirección

6	Protección contra chorros fuerte de agua	A la proyección de agua a chorros fuertes sobre la envolvente sumergida temporalmente en agua con una presión y un tiempo normalizado.
7	Protección contra los efectos de la inmersión en agua	Contra la penetración de agua en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida temporalmente en agua con una presión y un tiempo normalizados.
8	Protección contra la inmersión prolongada	El equipo es adecuado para la inmersión continua en agua bajo las condiciones específicas por el fabricante.

Nota: tomando del sistema de bibliotecas, acorde a DIN EN IEC 60529

Estos grados de protección son las que presenta según las características de placa del motor de inducción.

### 3.3 Metodología

Conforme Smith (2001), se debe considerar, primeramente, el tipo de conexión con que la maquina va a trabajar. Asimismo, se tiene: estrella o delta, trifásico o monofásico. En la figura se ilustra los tipos de conexión trifásica en estrella y delta.

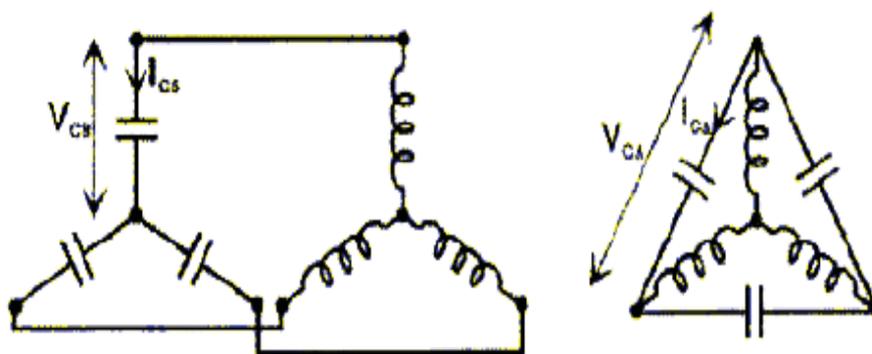


Figura 36. Configuración en estrella y delta respectivamente, dos capacitores de excitación en cada máquina trifásica

Fuente: (Nigel Smith, 1994, pág. 33)

En este caso el tipo de conexión de MAG es delta para una tensión de 220 voltios.

En la tabla siguiente se representa la relación clásica entre tensiones y corrientes de línea con tensiones y corrientes de fase, que son base para el cálculo de la resistencia capacitiva. En un banco conectado en delta, el valor del capacitor puede ser tres veces menor que en la conexión en estrella.

**Tabla 7.** *Relación de tensión y corriente en circuitos trifásicos conectados en estrella y delta*

	<i>Estrella</i>	<i>Delta</i>
<b>Tensión</b>	$V_{línea} = \sqrt{3} * V_{fase}$	$V_{línea} = V_{fase}$
<b>Corriente</b>	$I_{línea} = I_{fase}$	$I_{línea} = \sqrt{3} * I_{fase}$

Nota: tomando del sistema de bibliotecas (Nigel Smith, 1994, pág. 71).

### 3.4 Selección del Motor de Inducción para Operación como Generador.

Para elegir el motor de inducción para condiciones requeridas se tienen en cuenta diferentes características nombradas en cada capítulo, entre ellas que sea un motor de 4 polos este se debe encontrar con facilidad en el mercado nacional es decir que sea un producto comercial.

Por otro lado, sea una máquina eléctrica que se pueden acoplar a la turbo máquina hidráulica sin realizar ninguna modificación, ya que son reversibles eléctricamente.

la máquina de inducción de corriente alterna sea fácil de encontrar en cualquier mercado de máquinas eléctricas, por la disponibilidad, fácil adquisición de repuestos para su mantenimiento, precio y robustez

Las principales ventajas y desventajas de usar máquinas de inducción en lugar de síncronas para micro hidroeléctricas independientes según el autor Smith N, 1994, se ha mencionado en el capítulo II tabla 2.3 de las mencionadas ventajas son la que ameritan el uso del motor de inducción para su estudio en este trabajo.

En ese sentido ya mencionado los motivos por los cuales se ha seleccionado esta máquina, también se pone en mención que todo el grupo de generación a utilizarse se ha seleccionado máquinas reversibles, entre tanto tenemos el MAG y PAT, este grupo de generación con algunas modificaciones en la bomba y acoples de banco de capacitores a los terminales del motor hacen un equipo de generación de energía eléctrica.

De esta manera dentro del proyecto se utiliza equipos electromecánicos de costo económico, de fácil adquisición, de piezas adquiribles en el país, de fácil mantenimiento.

Por lo expuesto anteriormente para el presente proyecto se selecciona una máquina eléctrica de inducción jaula de ardilla, de las características siguientes:



Figura 37. Motor jaula de ardilla WEG

Fuente: propia.

Tabla 8. Datos de Placa de Características

<b>Modelo</b>	TE1BFOXO#	
<b>Potencia</b>	7.5	kW
<b>Voltaje</b>	220	V
<b>Frecuencia</b>	60	Hz
<b>Velocidad nominal</b>	1760	RPM
<b>Deslizamiento</b>	0.02	
<b>Número de polos</b>	4	Polos
<b>eficiencia</b>	91	%
<b>factor de potencia</b>	0.84	

Fuente: Propia

Para lograr el objetivo propuesto nuestro MAG tendrá necesariamente girar a una velocidad mayor que la síncrona para lograrlo se inyecta en su sistema eléctrico energía reactiva mediante un banco de condensadores.

### 3.5 Modelamiento y Calculo de Parámetros Eléctricos del Circuito Equivalente.

Para el generador de inducción auto excitado calculamos los parámetros eléctricos del circuito equivalente tomando muy en cuenta los valores que vienen en su placa de características, también estos datos se utilizan para el cálculo del banco de capacitores, estos datos son muy importantes a tomas en cuenta para ser probado operando como generador de inducción auto excitado mediante el uso de un banco de pruebas, donde se observará y se analizará experimentalmente el comportamiento del motor operando como generador.

Existen varios métodos, para este presente trabajo por varios factores se ha usado un método que mayormente ha sido recomendado por varios autores, para ello se usó ''

Datos de Catalogo'', este método requiere conocer datos de la placa de características, que viene dada por MAG adquirida, y valores de los parámetros del circuito equivalente.

En este trabajo la determinación de los parámetros del circuito equivalente ha sido desarrollada por el método datos del catálogo. Los parámetros han sido estimados y modelados mediante la técnica Haque y Pedra, formuladas en el documento ''Análisis de cálculo directo de los parámetros del circuito equivalente en una amplia muestra de motores de inducción trifásicos, L. Guasch, F.Gonzales, A.A. Jaramillo, L.Youb y J.A.Barrado''. (Cortes Comin, 2015, pág. 13).

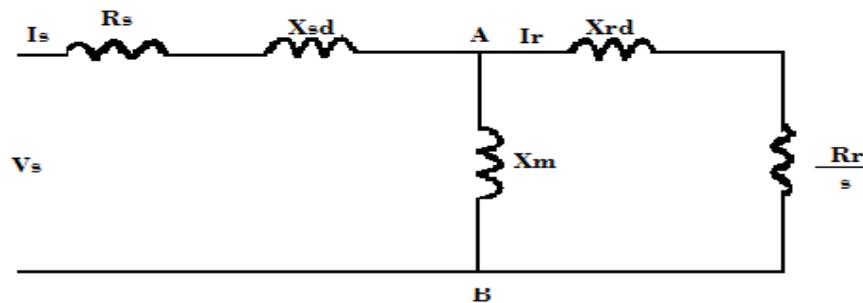


Figura 38. Circuito equivalente del motor jaula de ardilla

Fuente: propia

### 3.5.1 Modelamiento por la técnica del Haque.

Esta técnica desarrollada por M.H. Haque es una técnica desarrollada para buscar valores más aproximados para determinar los valores de los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción de jaula de ardilla sencilla con parámetros constantes. (Cortes Comin, 2015, pág. 14)

Además, podemos decir que es un método que no se basa en ensayos, si no que usa ecuaciones mediante análisis empíricos con multitud de interacciones con tal de aportar la mayor precisión que se pueda (Cortes Comin, 2015, pág. 14)

Las ecuaciones definidas en la técnica de Haque y las que se han utilizado para desarrollar el siguiente trabajo son:

- $R_r$ : Resistencia del rotor

$$R_r = \frac{P_N * S_N}{3I_N^2} \quad (01)$$

- $R_s$ : Resistencia del estator

$$R_s = \alpha_r * R_r \quad (02)$$

Donde:  $\alpha_r = 2.5$

- $X_{sd}$ : Inductancia del estator

$$X_{sd} = \frac{0.05 \frac{V}{\sqrt{3}}}{\sqrt{3} * I_N} \quad (03)$$

- $X_{rd}$ : Inductancia del rotor

$$X_{rd} = X_{sd} \quad (04)$$

- $X_m$ : Inductancia de magnetización

$$X_m = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{0.2 * I_N} \quad (05)$$

En las siguientes tablas observamos datos y valores de los parámetros eléctricos del circuito equivalente del motor.

*Tabla 9. Datos de entrada para el calculo*

<b>Potencia</b>	7500 W
<b>Potencia base (Pb)</b>	7500 W
<b>Tensión base (Vb)</b>	220 V
<b>Corriente base (Ib)</b>	11.36 A
<b>Impedancia de base (Zb)</b>	19.36 $\Omega$

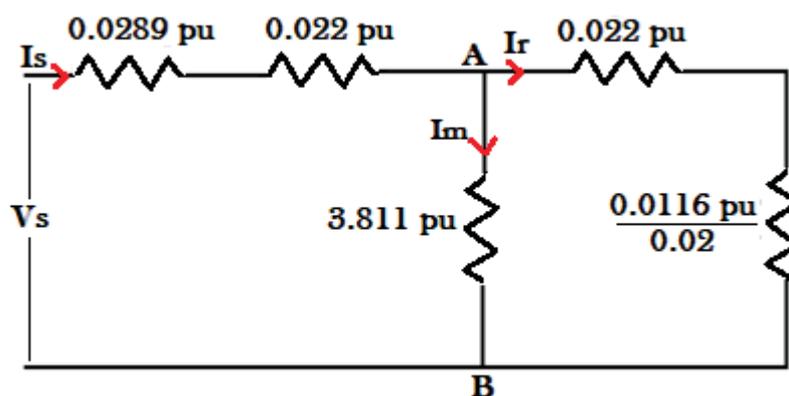
Fuente: Elaboración propia

Con los datos de la placa característica a valores por unidad trabajamos reemplazando los valores en las ecuaciones anteriores obtenemos los siguientes resultados.

*Tabla 10. Resultados de los parámetros del motor*

Parámetro	Por fase	Por fase
$R_s$	0.029 p.u.	0.561 $\Omega$
$R_r$	0.012 p.u.	0.232 $\Omega$
$X_{sd}$	0.022 p.u.	0.425 $\Omega$
$X_{rd}$	0.022 p.u.	0.425 $\Omega$
$X_m$	3.811 p.u.	73.781 $\Omega$

Fuente: Elaboración propia



*Figura 39. Circuito equivalente del motor jaula de ardilla*

Fuente: propia

### 3.6 Dimensionamiento de Banco de Capacitores para el Generador de Inducción Trifásico.

Para dimensionar el banco de capacitores para el funcionamiento de la máquina de inducción como generador auto excitado, lo ideal es conocer la curva de magnetización del motor y luego determinar la reactancia capacitiva necesaria para la autoexcitación del generador. Estos datos se pueden encontrar por datos del manual del fabricante o también llevando el generador hacer las pruebas necesarias en el laboratorio.

Existen varios métodos del cálculo de capacitores de donde en el artículo publicado por la universidad autónoma de occidente colombiana, quien realizo pruebas experimentales de varios métodos ya sea directos o analíticos de diferentes autores, con diferentes motores de diferentes marcas, recomiendan utilizar el método directo donde el cálculo del capacitor es directamente hallado con los valores que viene dada en la placa de características del motor.

Anteriormente hemos mencionado tres condiciones básicas para que el MAG funcione de manera independiente del sistema de potencia: primero llevamos la velocidad

de la máquina que sea mayor que la de sincronismo, segundo que exista magnetismo remanente y tercero conectar un banco de capacitores a los terminales del motor que tenga capacidad adecuada para compensar energía reactiva. De las tres opciones aplicamos el tercero para el cual existen métodos para el cálculo del banco de capacitores.

entonces tenemos varios métodos para el cálculo de capacitores de autoexcitación del generador de inducción:

- Métodos directos:
  - Método experimental:
    - Conexión a una fuente externa de reactivos.
    - Parámetros nominales del motor.
- Métodos analíticos:
  - Método analítico para el cálculo de capacitores por los investigadores Murphy, Nagamani y Satyanarayana (1988).
  - Método analítico para el cálculo de capacitores por los autores al Jabri y Alolah (1990).
  - Método analítico para el cálculo de capacitores según los autores Kumar, Kumaresan y Karthigaivel (2010).
  - Método analítico para el cálculo de capacitores por los autores Malik y Mazi (1987).
  - Método analítico para el cálculo de capacitores según Vázquez (2007).
  - Determinación de la capacitancia de autoexcitación usando el diagrama circular.

Para el desarrollo de este trabajo se procedió por el método directo, con los parámetros nominales del motor de inducción jaula de ardilla, seguidamente se procedió a realizar el cálculo de los capacitores guiadas por diferentes autores, pero con los mismos datos.

### **3.6.1 El Capacitor de Excitación**

Es necesario que exista una capacitancia mínima de excitación y de un campo magnético remanente en el entrehierro de la máquina, de manera que la fuerza magneto motriz inducida en el estator en el proceso de arranque y operación, permita que los capacitores de excitación, proporcionen la corriente reactiva para la excitación (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 18)

Cuando la velocidad y por ende la frecuencia de operación, es baja; el generador pierde su excitación haciendo que no exista un punto de operación o de intersección entre las curvas (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 19).

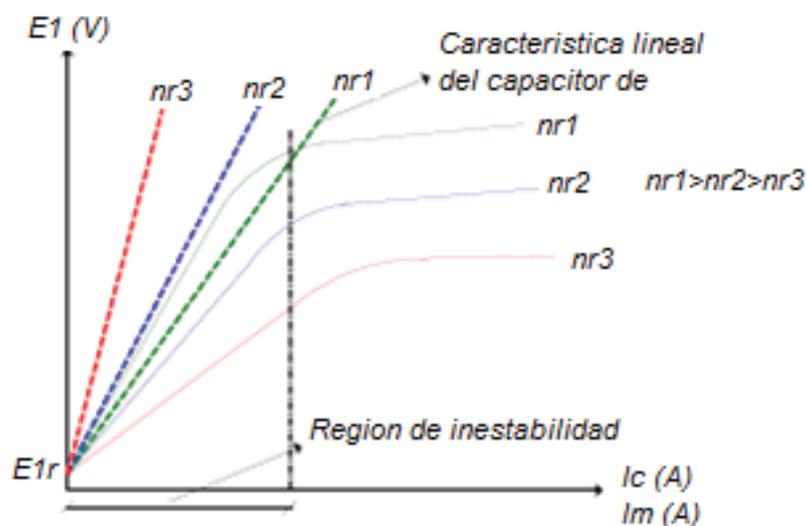


Figura 40. Características de operación del capacitor de excitación

Fuente: (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 19).

En la figura 40, la expresión  $E_{1r}$ , representa la fuerza electromotriz del flujo remanente. Con esto podemos calcular el valor adecuado del capacitor de excitación, para lo cual es necesario conocer el rango de velocidades del MAG, el nivel de voltaje, la frecuencia y las especificaciones de la carga (Ortiz, E. 2011).

### 3.6.2 Efecto de la Variación del Capacitor de Excitación.

A medida que el valor del capacitor de excitación varié, no influye tanto sobre la frecuencia de operación del MAG, pero con respecto a la tensión en los terminales del MAG, la variación del capacitor de excitación afecta significativamente al voltaje generado (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 19).

Por ejemplo, si la máquina opera en vacío existirá una caída de tensión, a medida que el capacitor de excitación varié cambiara la característica lineal tensión vs corriente del capacitor, provocando otro punto de intersección de la fuerza electromotriz inducida  $E_1$ , Ortiz (2011) refiere que la curva de magnetización, como se puede apreciar en la figura 41, en la que se señala también que el aumento del capacitor de excitación, disminuye la pendiente de su característica lineal, aumentando de esta manera el voltaje terminal generado (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 20).

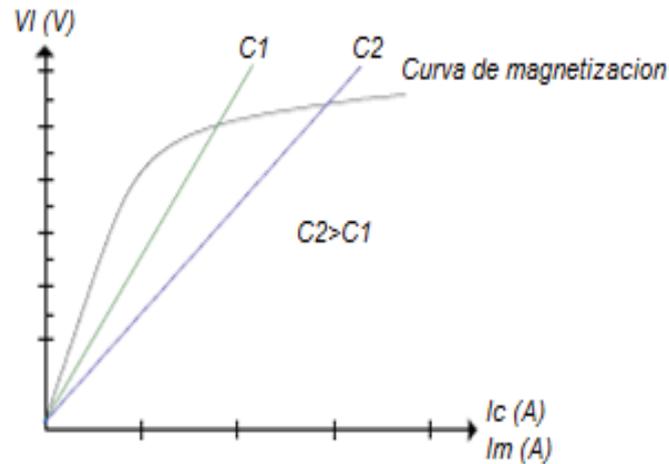


Figura 41. Característica Tensión vs. Corriente de excitación y de magnetización

Fuente: (Ortiz Campo & Erazo Muñoz, 2011, pág. 20)

### 3.6.3 Cálculo del Banco de Capacitores para MAG.

El MAG, operara como generador aislado, independiente de cualquier sistema de potencia, siempre y cuando los capacitores estén disponibles para suministrar la potencia reactiva requerida por el generador (Martinez, 2017, pág. 10).

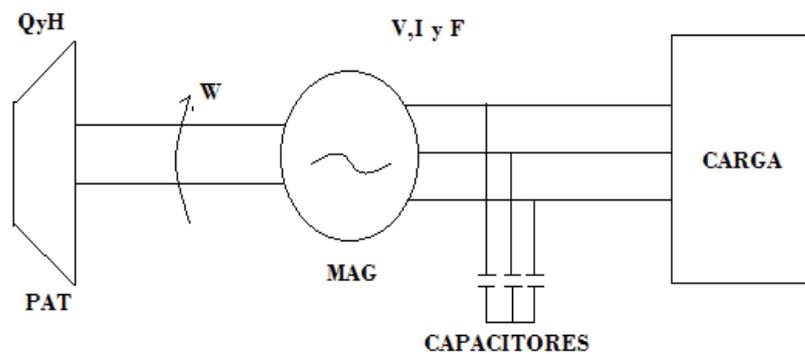


Figura 42. Grupo Hidroeléctrico aislada operando con máquinas reversibles

Fuente: Propia.

Se ha utilizado tres métodos extraídos de estudios ya realizados y publicados en la página web del instituto de ingenieros en electricidad, electrónica y computación IEEE.

Primero Uno de los métodos que se utilizó en este trabajo es por (A.K. Al Jabri, MSc, MA, PhD y A.I. Alolah, BSc, PhD, 2017), plantean una muestra del desarrollo de un método simple y directo para encontrar el valor de la capacitancia requerida de un

generador de inducción para una carga RL. obtienen dos ecuaciones no lineales resueltas para obtener dicha capacitancia.

Muestra un método directo para hallar la mínima capacitancia requerida por el MAG. En la figura, se aprecia el circuito equivalente por fase del generador con carga RL.

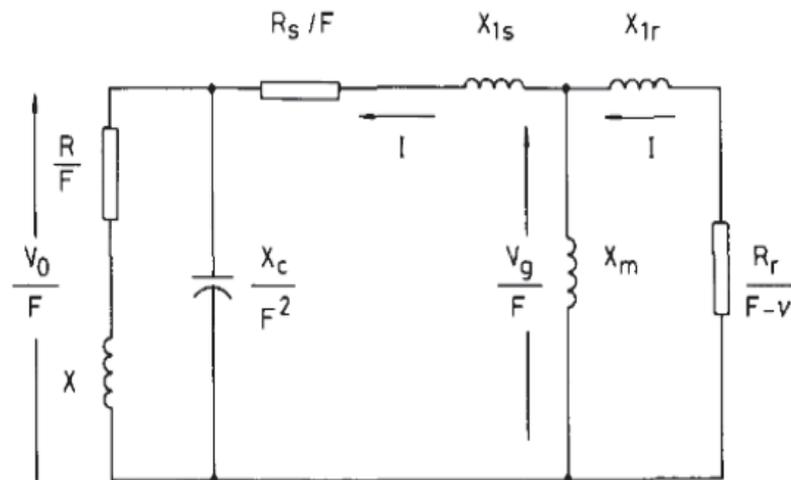


Figura 43. circuito equivalente por fase del MAG auto excitado bajo una carga RL

Fuente (DAVIS MARTÍNEZ, 2017, pág. 14)

Donde:

$R_s$  : Resistencia del estator por fase en p.u

$R_r$  : Resistencia del rotor referido al estator por fase en p.u

$R$  : Resistencia de carga por fase en p.u

$X_{ls}$  : Reactancia del estator por fase en p.u

$X_{lr}$  : Reactancia del rotor referido al estator por fase en p.u

$X$  : Reactancia de carga por fase en p.u

$X_m$  : Reactancia magnética por fase en p.u

$X_{smax}$  : Máxima saturación de reactancia magnética en p.u

$C$  : Capacitancia de excitación por terminal de fase

$X_c$  : Reactancia capacitiva en P.U del capacitor de excitación por

terminal de fase.

$F$  : Frecuencia en p.u

$v$  : Velocidad en p.u

$V_0$  : Tensión de salida.

Para comenzar, se igualan  $X_m$  a  $X_{smax}$ , entonces igualando tenemos:

$$X_m = X_{smax}$$

Seguidamente, se tiene que  $X_C$  es:

$$X_C = \frac{A_1 F^4 - A_2 F^3 - A_4 F}{A_3 F - A_5} \quad (10)$$

$$X_C = \frac{B_1 F^4 - B_2 F^3 - B_4 F^2 - B_6 F}{B_3 F^2 - B_5 F - B_7} \quad (11)$$

Donde:

$$T = X_{ls} + X_m = X_{lr} + X_m \quad (12)$$

$$W = X_{ls} + X_{ls} // X_m \quad (13)$$

$$A_1 = RTW + XT(R_s + R_r) \quad (14)$$

$$A_2 = vT(RW + R_s X) \quad (15)$$

$$A_3 = R_r(X + T) + T(R_s + R) \quad (16)$$

$$A_4 = RR_s R_r \quad (17)$$

$$A_5 = vT(R + R_s) \quad (18)$$

$$B_1 = XTW \quad (19)$$

$$B_2 = vB_1 \quad (20)$$

$$B_3 = T(X + W) \quad (21)$$

$$B_4 = RT(R_s + R_r) + R_s R_r X \quad (22)$$

$$B_5 = vB_3 \quad (23)$$

$$B_6 = vRR_s T \quad (24)$$

$$B_7 = R_r(R + R_s) \quad (25)$$

Debido a que se busca el valor de

$$C = 1/2\pi f_b Z_b X_c \quad (26)$$

Reemplazando valores en las siguientes ecuaciones, se obtiene dos raíces reales

$$F_1 \quad 59.646 \text{ Hz}$$

$$F_2 \quad 43.164 \text{ Hz}$$

Para hallar el valor mínimo del capacitor, se escoge la raíz real mínima de estas dos raíces reales obtenidas el cual será la mínima capacitancia requerida por MAG. Sustituyendo estos resultados en la ecuación número 26, se tiene que la capacitancia requerida por fase para una carga es:

$$C = 104.4278 \mu F$$

De acuerdo al método seleccionado para poder hallar la mínima capacitancia requerida por el MAG, se asumió que la velocidad es constante, cuando va trabajando como grupo de generación aislado.

Segundo, Chapallaz y Eichenberger (1992) indica que es necesario hacer un cálculo de capacitores para el motor de inducción a partir de los valores nominales y con ello hallar la potencia reactiva necesaria para la autoexcitación del MAG sea posible.

Entonces primero es necesario hallar el valor de la potencia máxima de salida como generador.

Sabemos que la potencia máxima de salida como generador cuando se genera no debe exceder la potencia de entrada:

$$\text{Motor: } P_n = S * \cos \phi_m \eta_m \quad (27)$$

$$S = \sqrt{3} * V_L I_L \quad (28)$$

$$\text{Generador: } P_{elg} = S * \cos \phi_g \quad (29)$$

Condición:  $S_m = S_g$ , también sabemos una relación de demanda de potencia reactiva entre la generación y el motor (*sin  $\phi$  – relacion*) de:

$$1.35 = \frac{\sin \phi_g}{\sin \phi_m} \quad (30)$$

Sabemos que:  $\cos \phi_m = 0.84$

Entonces de la condición tenemos despejado la potencia máxima generada donde también reemplazamos el valor de  $\cos \phi_g = 0.68$  hallada de la ecuación (30).

$$P_{elgmax} = \frac{\cos \phi_g}{\eta_m \cos \phi_m} P_n \quad (31)$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos el valor de la potencia máxima generada.

$$P_{elgmax} = \frac{0.68}{0.91 * 0.84} * 7.5$$

$$P_{elgmax} = 6.67 \text{ kW}$$

Suponiendo que las pérdidas totales al conducir son iguales a las perdidas en el modo generador, con esto ahora podemos determinar la potencia de entrada necesaria del motor primario, en este caso la potencia en el eje de la bomba operando como turbina así para impulsar el MAG.

$$P_{motor} = P_{generador} = P_n \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right) = 0.74 \text{ kW}$$

Entonces reemplazando en la fórmula de la potencia mecánica máxima requerida en el eje de la turbina, tenemos el valor calculado.

$$P_{mecgmax} = P_{elg} + P_{motor} = P_{elg} + P_n \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (32)$$

$$P_{mecgmax} = 6.685 + 0.74 = 6.685 + 7.5 \left( \frac{1}{0.91} - 1 \right)$$

$$P_{mecgmax} = 7.425 \text{ kW}$$

De aquí la correspondiente eficiencia del generador a la máxima potencia eléctrica de salida según la formula será:

$$\eta_{gmax} = \frac{1}{\frac{P_n}{P_{elg}} \left( \frac{1}{\eta_m} - 1 \right) + 1} \quad (33)$$

$$\eta_{gmax} = 0.9001$$

Finalmente podemos calcular la demanda de la potencia reactiva requerida por el MAG.

$$Q_m = P_{el_m} \tan \phi \quad (34)$$

$$P_{el_m} = \frac{P_n}{\eta_m} = 8.242 \text{ kW}$$

$$Q_m = 8.242 * \tan(32.85) = 5.322 \text{ kVAR.}$$

De la ecuación número 30, donde conocemos la relación de demanda de potencia reactiva entre el generador y motor, de ahí la potencia reactiva a generar es:  $Q_g = 1.35 * 5.322 = 7.185 \text{ kVAR}$  de donde también los condensadores para una distribución trifásica a 220 en delta será calculada mediante la siguiente ecuación.

$$C_{\Delta \text{ por fase}} = \frac{Q_g * 10^6}{3 * 2\pi * f * V_L^2}$$

$$C_{\Delta \text{ por fase}} = \frac{7185 * 10^6}{3 * 2\pi * 60 * 220^2}$$

$$C_{\Delta \text{ por fase}} = 131.259 \mu\text{F}$$

Estos capacitores se dividen en dos conjuntos, los condensadores de excitación y los condensadores de carga veamos la representación en la siguiente figura.

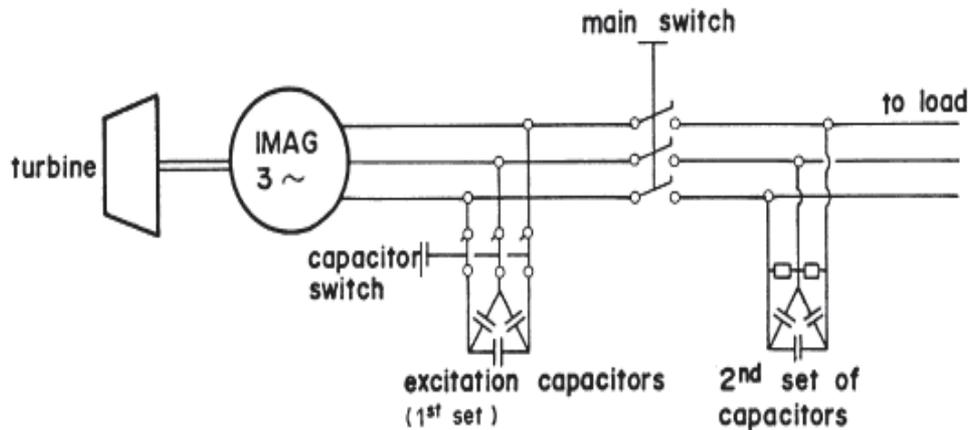


Figura 44. Puesta en marcha de un MAG en funcionamiento aislado utilizando dos conjuntos separados de condensadores

Fuente: (Chapallaz, Eichenberger, & Fischer, 1992, pág. 69)

De ahí los valores de capacitores de excitación calculados que se desarrolla en el contenido de este método, finalmente se suele tomar como la capacitancia de carga nominal del motor que corresponde aproximadamente a la capacitancia en vacío del generador.

$$Q_{excit} = Q_m = \frac{P_n}{\eta_m} * \tan(\cos^{-1} \phi_m)$$

$$Q_{excit} = Q_m = \frac{7.5}{0.91} * \tan(32.85) = 5.322kVAR.$$

$$C_{excit \text{ por fase}} = \frac{Q_{excit} * 10^6}{3 * 2\pi * f * V_L^2}$$

$$C_{excit \text{ por fase}} = \frac{5322 * 10^6}{3 * 2\pi * f * V_L^2}$$

$$C_{excit \text{ por fase}} = 97.224\mu\text{F}$$

Finalmente, a partir de los resultados que se tienen de los dos métodos de hallar el valor de capacitor, podemos adquirir el banco de capacitores.

En el mercado podemos encontrar valores no exactamente al valor que se halló, pero si aproximados, y como se sugiere también por los autores que desarrollaron cada

método es que el capacitor que se adquiriera sea del valor mayor al calculado, entonces en la figura 46 se tiene el capacitor adquirido para este trabajo.



Figura 45. Capacitor de trabajo

Fuente propia.

El valor de los capacitores para cada fase es de 110uf.

Para obtener el banco de capacitores es importante también conocer que existen capacitores de arranque y de marcha, veamos a continuación las diferencias en la figura 47, además de aquí nuestra selección del capacitor que se hizo, en este trabajo se usan un banco de capacitores de marcha de diferentes valores.

	<p><b>CARACTERÍSTICAS CAPACITOR DE ARRANQUE</b></p> <p>Capacitor seco o electrolítico.          No puede permanecer por mas de 3 segundos en el circuito.          Requiere de un Relé que lo desconecte del circuito          En ingles es conocido como capacitor electrolito (start).          Factores de capacitancia entre 180 y 350 MFD.          Por lo general son de color negro.</p>
	<p><b>CARACTERISTICAS CAPACITOR DE MARCHA.</b></p> <p>Permanece conectado en el circuito por todo el tiempo.          Trae dos factores de capacitancia.          En ingles es conocido como (run).          Su capacitancia menos de 80 MFD.          Por lo general son de color blanco o gris.</p>

Figura 46. Diferencias entre un capacitor de arranque y de marcha

Fuente: Propia

### 3.6.4 El Proceso de Autoinducción

El proceso de autoexcitación o autoinducción del MAG, es un proceso electromagnético por el cual aparece una tensión en el entrehierro de la máquina en este caso del motor, es semejante cuando ocurre con en el generador shunt de corriente continua o en máquinas sincrónicas de imanes permanentes.

Guerrero (2006) refiere que cuando el rotor de la máquina empieza a girar, el flujo remanente induce en las bobinas del estator una fuerza electromotriz inicial, la cual hace circular por el capacitor de excitación una pequeña corriente, esta corriente circula por los devanados del estator fortaleciendo el campo magnético y la fuerza electromotriz E1.

En este proceso de autoinducción la fuerza electromotriz inducida y la corriente en los devanados del estator del MAG, se obtienen por medio de la influencia de la saturación magnética de la máquina, hasta alcanzar un estado estable de operación. (Guerrero Cuesta, 2006, pág. 19)

### 3.7 Pérdidas y Diagrama de flujo de Potencia

Chapman (2012) refiere que se puede describir a un motor de inducción básicamente como un transformador rotatorio, en la entrada es un sistema trifásico de tensiones y corrientes, en un transformador ordinario, la salida es la potencia eléctrica de los devanados secundarios en cambio en un motor de inducción los devanados secundarios están cortocircuitados, por lo que no hay salida de electricidad de los motores normales de inducción. pero, la salida es mecánica. La relación entre la potencia eléctrica de entrada y la potencia mecánica de salida del motor se muestra en el diagrama de flujo de potencia que muestra la figura siguiente (Chapman, 2012, pág. 241).

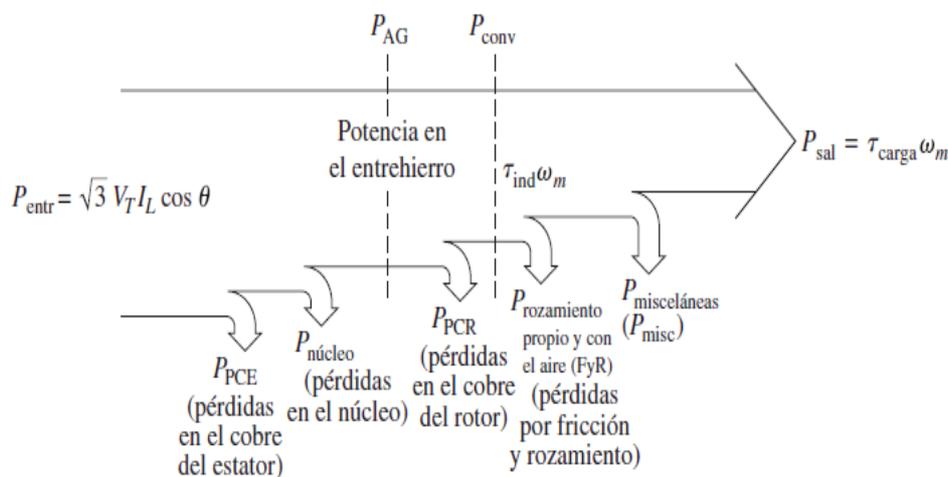


Figura 47. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción

Fuente: (Chapman, 2012, pág. 24)

$$P_{entr} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \theta$$

$$P_{entr} = P_{AG} + P_{PCE} + P_{NUCLEO}$$

$$P_{AG} = P_{CONV} + P_{PCR}$$

$$P_{CONV} = P_{SAL} + P_{ROZY AIRE} + P_{MISC}$$

### 3.7.1 Cálculo de las pérdidas del motor de inducción

Potencia de entrada:

$$P_{entr} = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \theta = \sqrt{3} * 220 * 25.8 * 0.84 = 8258.141 W$$

Potencia de Salida:  $P_{SAL} = 7500 W$

Perdidas en el cobre del estator:  $P_{PCE} = 3 * R_S * I_S^2 = 37.2 W$

Perdidas en el núcleo:  $P_{NUCLEO} = 3 * R_{fe} * I_{re}^2 = 0 W$ , se considera  $R_{fe} = 0$

Potencia en el entrehierro:  $P_{AG} = 8258.141 - 37.26 = 8220.881 W$

Perdidas en el cobre del rotor:  $P_{PCR} = 3 * \frac{R_r}{s} * I_r^2 = 148.0914 W$

Potencia convertida:  $P_{CONV} = P_{AG} - P_{PCR} = 8220.881 - 148.0914 = 8072.7896 W$

Perdidas por fricción, rozamiento y por misceláneas:

$$P_{ROZY AIRE} + P_{MISC} = P_{CONV} - P_{SAL} = 8072.7896 - 7500 = 572.7896 W$$

### 3.8 Análisis A partir del Circuito equivalente del Generador de Inducción.

El funcionamiento de la máquina de inducción podemos definir que es el mismo al de un transformador considerando al estator como primario y al rotor como secundario, en el circuito equivalente el secundario reflejado al primario.

De esta forma podemos presentar los parámetros del rotor reflejados en función de los parámetros del estator para así construir el circuito equivalente, es así como anteriormente se obtuvo los resultados de cada valor de los parámetros eléctricos y finalmente se hizo una programación en Matlab, de la simulación se obtiene curvas del funcionamiento como motor y generador, veamos en las siguientes figuras:

En esta primera figura de acontinuacion se muestra el torque vs la velocidad, curva caracteristica de la maquina funcionando como motor.

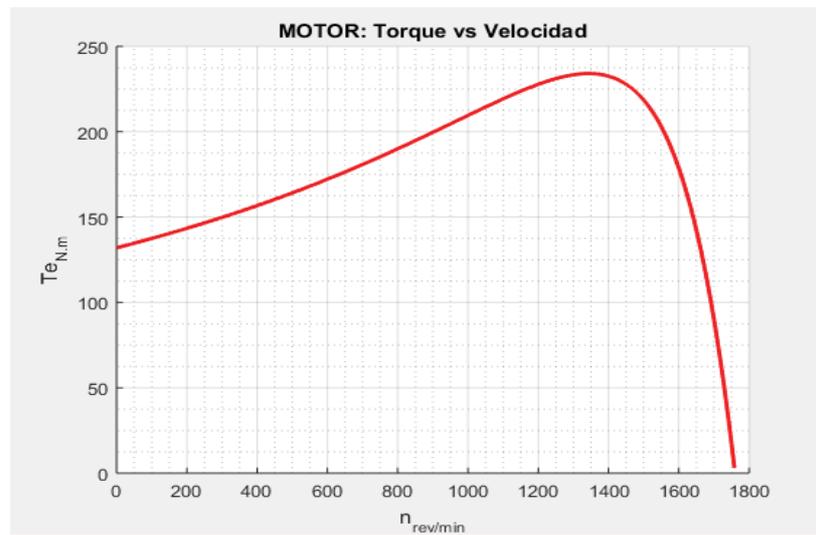


Figura 48. Torque vs velocidad del motor WEG

Fuente: propia

De la figura anterior podemos observar la maquina operando como motor.

En la siguiente figura visualizada muestra la curva característica de la corriente de magnetización vs velocidad, funcionamiento como motor.

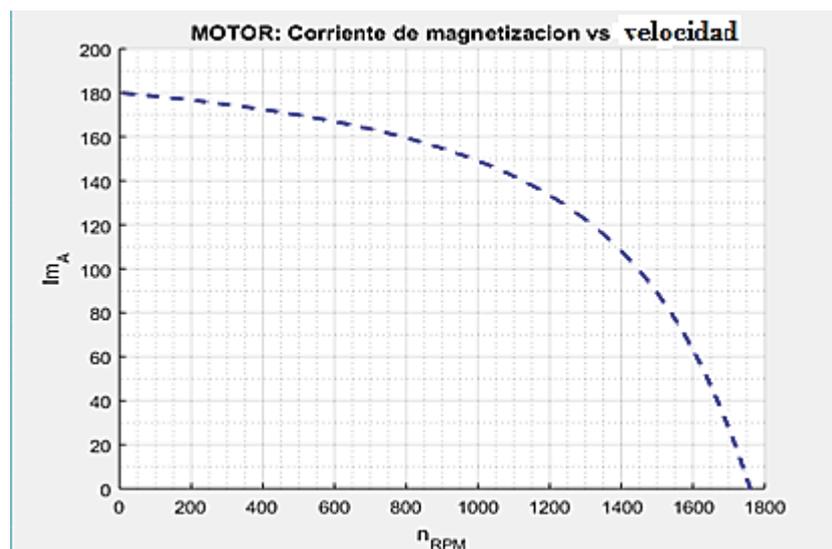


Figura 49. Corriente de magnetización vs velocidad del motor.

Fuente: Propia

En la figura anterior se observa a mayor corriente de magnetización mayor es la velocidad del MAG.

En la figura siguiente se muestra el torque vs la velocidad del motor ya acoplado con los capacitores calculados en vacío.

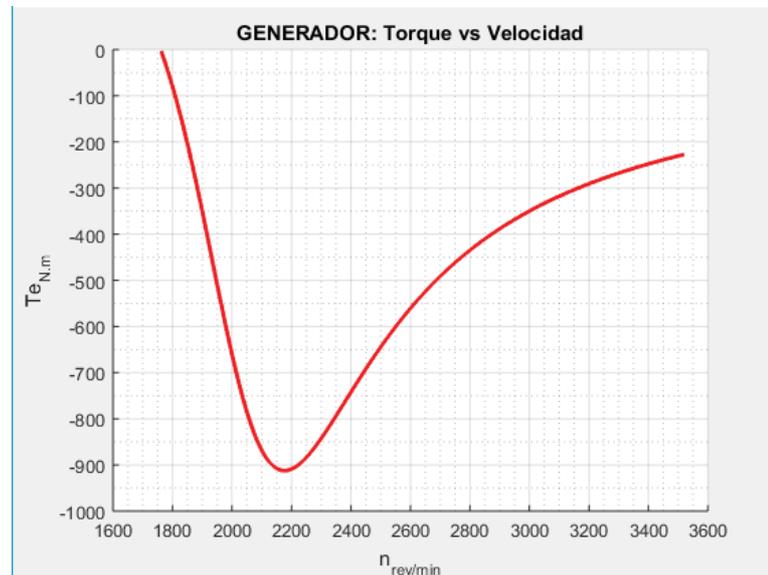


Figura 50. Torque vs la velocidad del MAG sin carga.

Fuente: Propia

En la figura anterior se observa la operación de la maquina como generador.

En la figura siguiente se muestra la curva característica de la corriente de magnetización vs el torque del MAG.

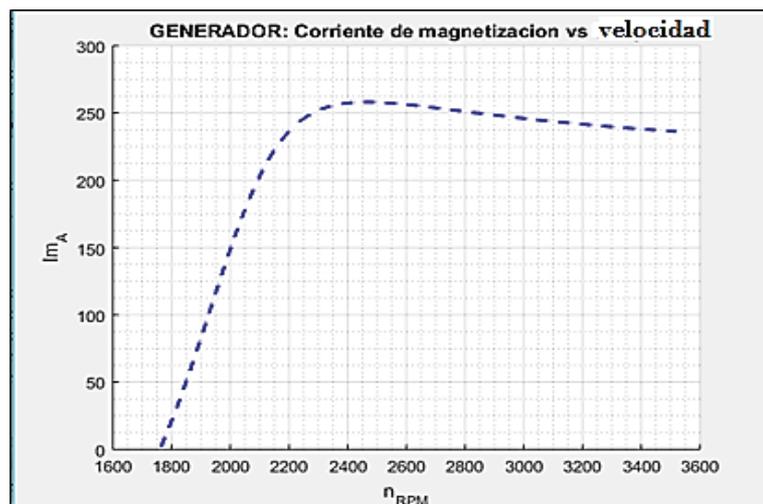


Figura 51. Corriente de magnetización vs velocidad del MAG.

Fuente: propia

De la figura anterior podemos decir que a mayor velocidad la corriente de magnetización aumenta.

En la figura siguiente se observa la curva característica del torque vs la velocidad del MAG a plena carga.

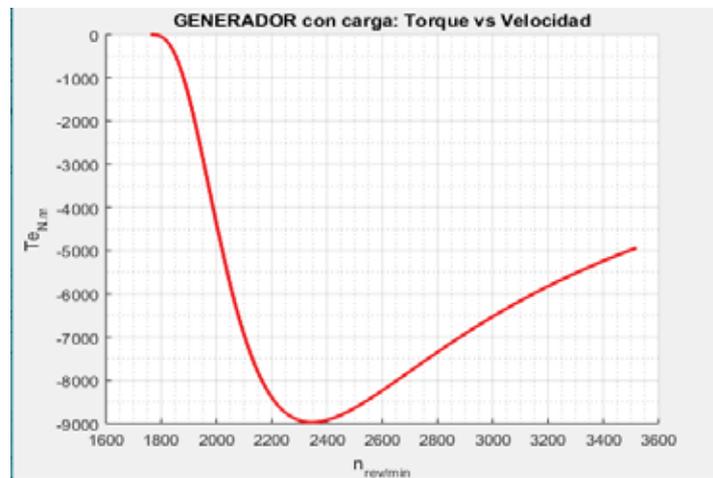


Figura 52. Torque vs velocidad del MAG a plena carga.

Fuente: Propia

De la figura anterior se observa que la maquina funciona en su máxima eficiencia alrededor de 1800rpm.

La figura siguiente indica la curva característica de la corriente de magnetización vs la velocidad del MAG a plena carga.

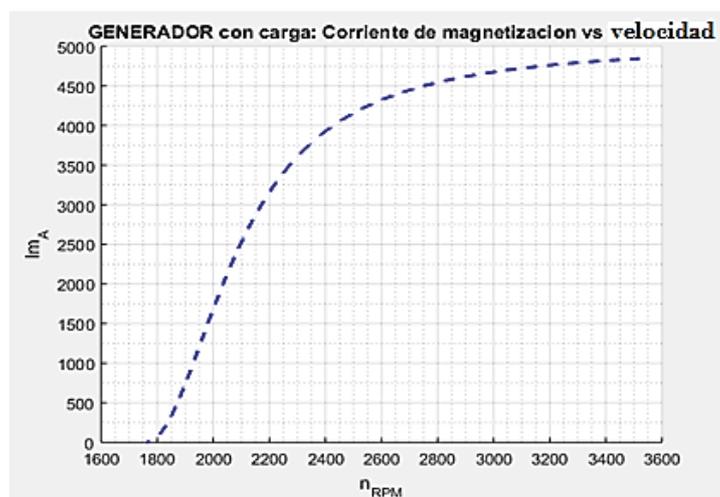


Figura 53. Corriente de magnetización vs velocidad del MAG a plena carga

Fuente: Propia

De la figura anterior a mayor velocidad la corriente de magnetización aumenta.

En la figura siguiente muestra la curva característica de la tensión en la salida vs la corriente de excitación del MAG.

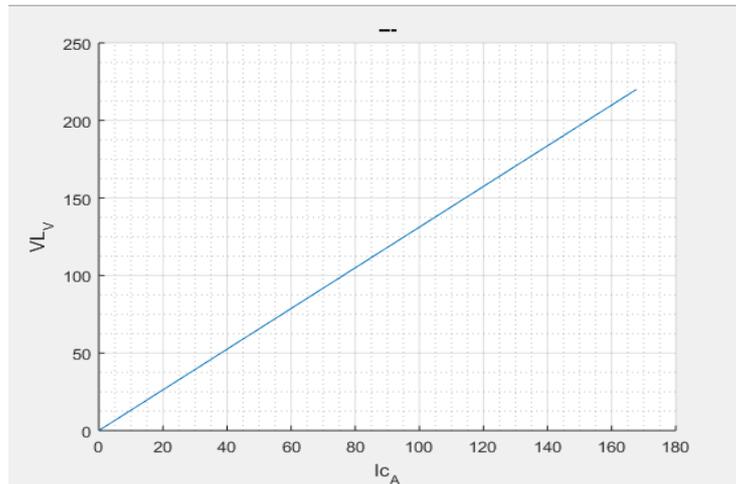


Figura 54. Tensión de salida vs corriente de excitación del MAG.

Fuente: Propia

Para la gráfica anterior se consideró como material ferromagnético ideal, de aquí se puede concluir que a medida que la corriente de excitación aumenta la tensión salida se incrementa.

En la siguiente figura visualizada nos muestra el torque vs la velocidad de ambos, una combinación de curvas, operación motor y operación como generador.

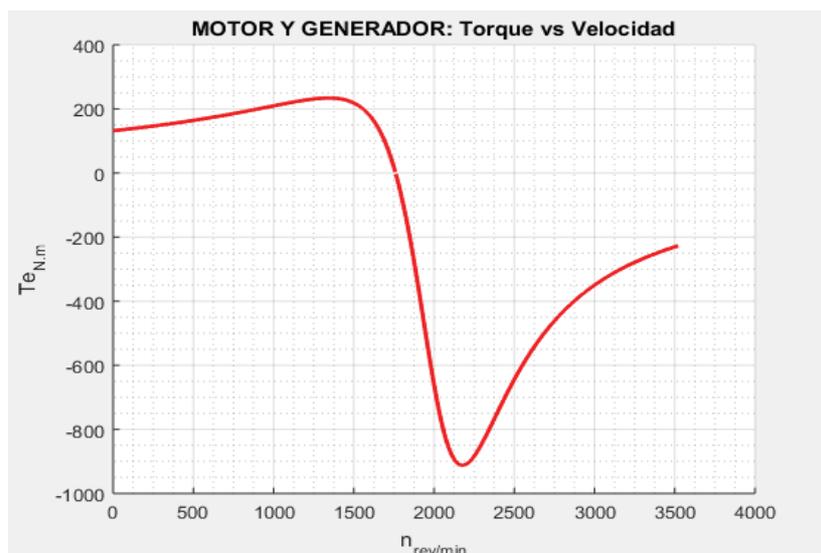


Figura 55. Torque vs velocidad, motor y generador.

Fuente: Propia

En la figura anterior se observa el comportamiento de la maquina como motor y generador.

La figura siguiente también muestra el torque vs la velocidad, del motor y generador a plena carga.

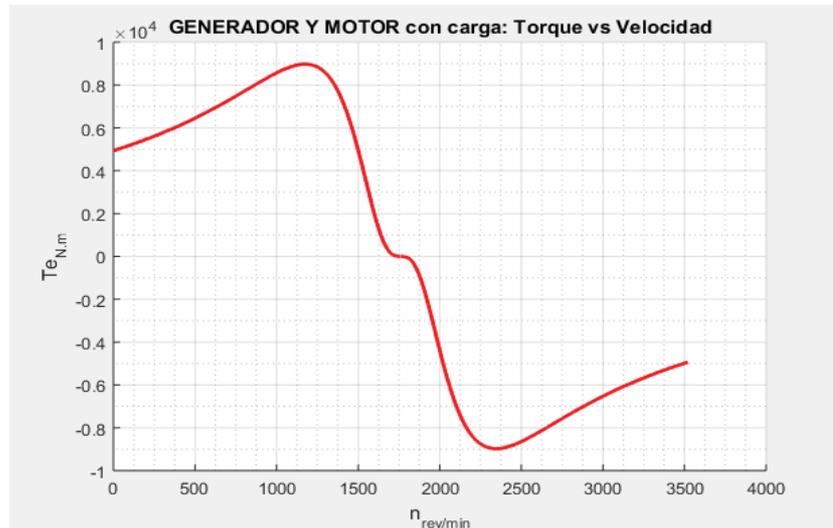


Figura 56. Torque vs velocidad operación motor y como generador.

Fuente: Propia

De esta última figura se observa que cuando el torque es positivo la maquina está operando como motor, caso contrario si el torque es negativo opera como generador.

Para finalizar es necesario mencionar que las figuras obtenidas de las simulaciones se han realizado a partir de una maquina ideal.

## CAPITULO IV

### **4 CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DEL GRUPO HIDROELÉCTRICO**

#### **4.1 Definición de una Arquitectura de Red Comunicación en Automatización y Control.**

El pensamiento de arquitectura de automatización e integración moderna, tiene como objetivo la búsqueda de nuevas técnicas que nos sirven de estrategia de implementación en la automatización industrial y la búsqueda de procesos de manufactura más ágiles, robustos y eficientes, la tendencia de la automatización es hacia el planteamiento de las arquitecturas modernas desarrolladas sobre sistemas multilaterales.

#### **4.2 Tipos de Redes de Comunicación en Automatización y Control.**

Dentro de las comunicaciones de automatización existes diferentes tipos de conexión entre los dispositivos de automatización desde controladores, actuadores, HMI, sensores, etc. a continuación se describe los tipos de comunicación que se utiliza dentro de la industria de la automatización.

A continuación, nombramos los tipos de redes de comunicación.

##### **4.2.1.1 Red en Anillo.**

Es una red en la que las estaciones se conectan formando un anillo.

##### **4.2.1.2 Red en Árbol.**

Es una red en la que los nodos están colocados en forma de árbol.

##### **4.2.1.3 Red en Malla.**

Es una red en la que cada nodo está conectado a uno o más de los otros nodos

##### **4.2.1.4 Red en bus.**

Es una red en la que todas las estaciones están conectadas a un único canal de comunicaciones por medio de unidades interfaz y derivadores

##### **4.2.1.5 Red en estrella.**

Es una Red en la cual las estaciones están conectadas directamente al servidor u ordenador y todas las comunicaciones se han de hacer necesariamente a través de él.

#### 4.2.1.6 Red inalámbrica WIFI o celular.

Es una red que hace posible sin necesidad de instalación conectarse a una red local cualquier dispositivo, lo que permite que nos podamos pasear libremente por la oficina con nuestro teléfono móvil conectado a la red, esta red logra conectar sin cables a cámaras de vigilancia en los lugares más inaccesibles.

La desventaja de esta red es que permite la inseguridad de información de trabajo. A continuación, se muestra en la figura siguiente imágenes de cada tipo de red de comunicación.

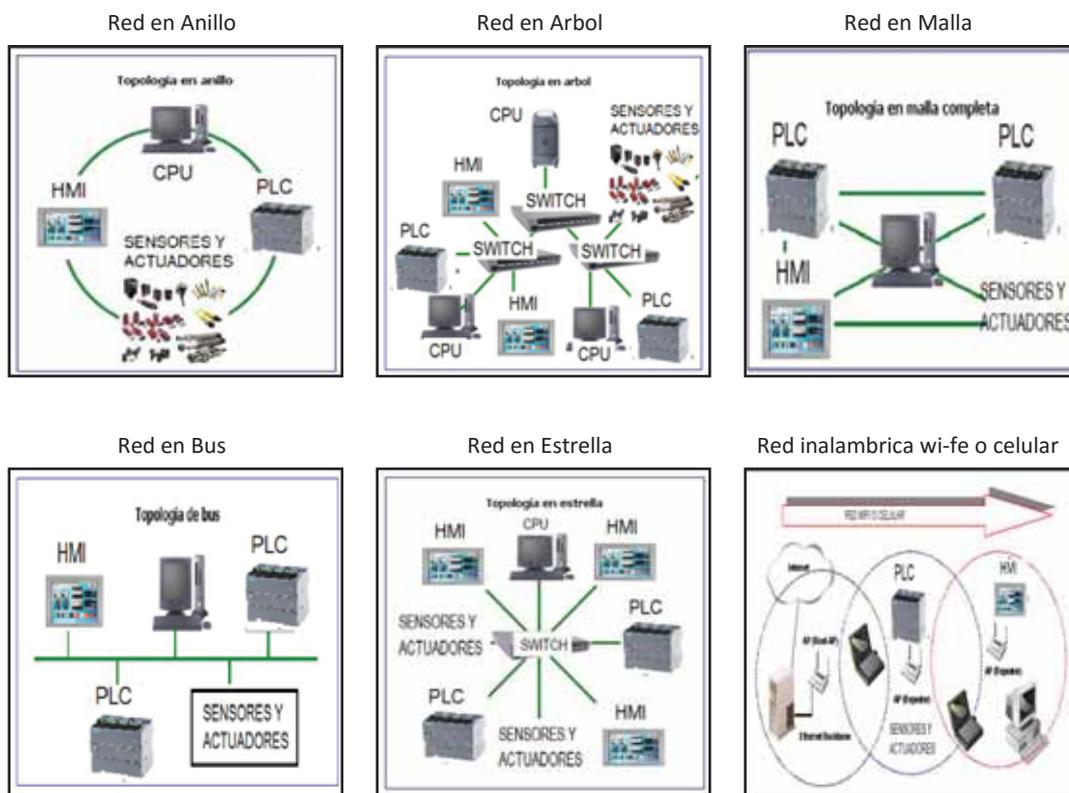


Figura 57. Tipos de Red de Comunicación

Fuente: Web (<https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/los-tipos-de-redes-mas-conocidos/>)

#### 4.2.2 Selección de una arquitectura de comunicación para el control de banco de pruebas.

Para este trabajo será con la interconexión de CPU, PLC, HMI y Sensores, y las redes de comunicación suficiente a usar será red anillo y red bus.

### 4.2.3 Software SCADA para automatización del grupo de generación.

Este software SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) que se puede entender por Supervisión, Control y Adquisición de Datos, es un sistema muy usado en las grandes industrias porque permite controlar procesos industriales localmente a grandes distancias, logrando monitorear recopilando y procesando datos en tiempo real, también permite interactuar con dispositivos como sensores, válvulas, señales de tráfico, entre otros, y finalmente logra grabar eventos en su registro.

En la figura siguiente tenemos una representación del sistema SCADA.

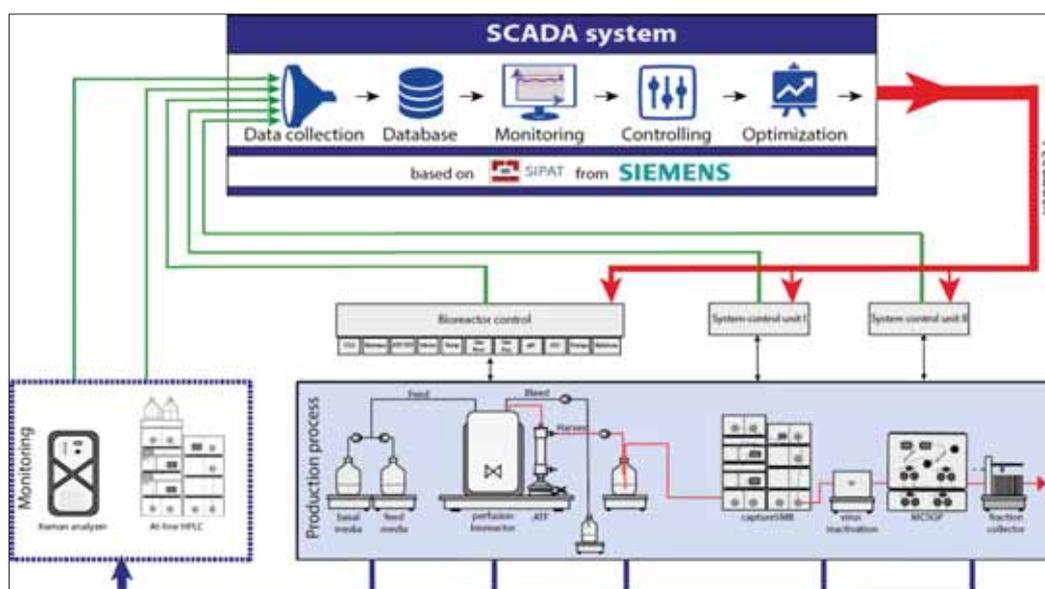


Figura 58. Sistema de software SCADA.

Fuente: Web (<https://www.cursosaula21.com/que-es-un-sistema-scada/>)

Los sistemas de software SCADA son muy favorables para los procesos de grandes empresas e industrias, por que ayudan eficazmente, procesar datos para tomar decisiones más inteligentes, también mejora la solución de problemas de inactividad reduciendo en tiempo de comunicación del aviso para el análisis de datos y toma de decisiones en menor tiempo posible. En este trabajo se ha hecho uso de este sistema usando el modelo de sus componentes.

El sistema SCADA tiene tres componentes principales como:

- Múltiples Unidades de Terminal Remota (también conocida como UTR, RTU o Estaciones Externas).
- Estación Maestra y Computador con HMI.
- Infraestructura de Comunicación.

## 4.2.4 Sistema de Control y Automatización para el Banco de Pruebas

### 4.2.4.1 antecedentes

Los sistemas de control y automatización existieron siempre para el control de centrales hidroeléctricas, las primeras instalaciones de control se realizaban mediante sistemas mecánicos como el regulador de watt, estos sistemas de control mecánico eran robustos, costosos y poco precisos; con el avance de la tecnología se empezaron a utilizar sistemas de control basados en microprocesadores los cuales redujeron los costos y la robustez de las instalaciones y además de ello mejoraron la precisión de control.

En la siguiente figura se observa un regulador oleo mecánico utilizado en el control de turbinas de generación eléctrica.

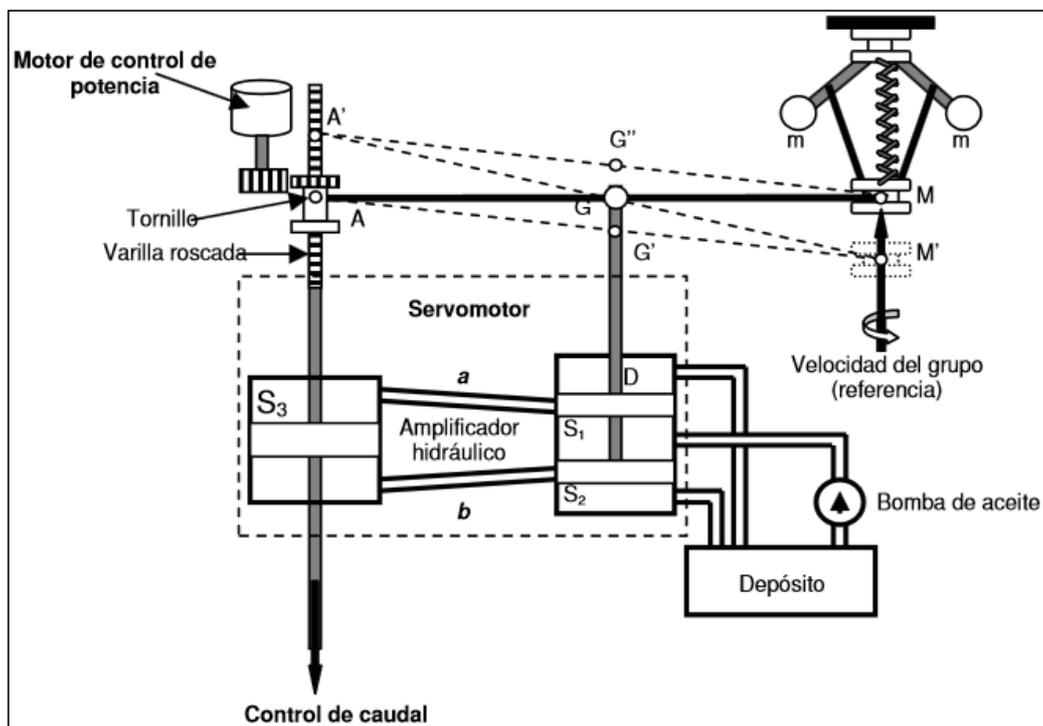


Figura 59. Regulador mecánico utilizado para el control de turbinas de generación eléctrica

Fuente: Web ([www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf](http://www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf), s.f.).

En la figura siguiente nos muestra un Sistema de control electrónico moderno con carga lastre veamos.

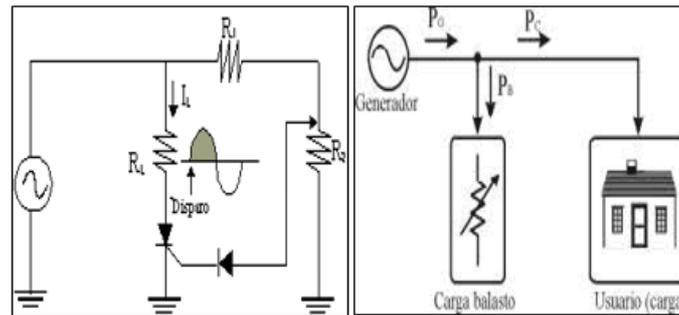


Figura 60. sistema de control moderno con carga lastre.

Fuente (Hidrored, 2009)red

Tomando en cuenta lo importante que son los sistemas de control estudiaremos seguidamente las partes o componentes en lo que se dividen.

#### 4.2.5 software de control.

Uno de los componentes de los sistemas de control moderno es el software de control como el sistema de SCADA que anteriormente se ha definido su utilidad lo eficiente y lo beneficioso que presenta ser en campos de ingeniería. Esta importante recordar que el sistema SCADA mejora la eficacia del proceso de monitoreo, proporcionando un control de la información oportuna para así tomar decisiones operacionales apropiadas.

#### 4.2.6 Sensores, Actuadores y Periféricos.

Son dispositivos con diferentes funciones necesarios e importantes para la automatización y control de un grupo de generación.



Figura 61. sensores, actuadores, periféricos.

Fuente: Web (<https://www.monografias.com/trabajos5/perif/perif.shtml>).

- Los sensores se pueden clasificar en función a sus datos de salida por ejemplo en Digitales, Analógicos, comunicación por bus.
- En el caso de los actuadores también podemos mencionar que estos reciben órdenes de regular, controlar y en función a este genera un orden para activar un elemento final de control, existen varios tipos de actuadores como Electrónicos, Hidráulicos, Neumáticos, eléctricos, entre otros más.
- Podemos mencionar algunos ejemplos de periférico Ejemplos de periféricos como son los Indicadores luminosos, pantalla LCD, cámaras, memorias, Displays numéricos, entre otros más.

#### 4.2.7 Selección de software de automatización para el banco de pruebas.

De acuerdo a lo requerido por nuestra instalación se pueden utilizar los siguientes sistemas SCADA:

- WINCC.
- HTML, JAVASCRIPT, CSS.
- MATLAB.
- LABVIEW.

Para nuestro trabajo se utilizó el HTML, JAVASCRIPT, CSS, de tal forma que mediante una dirección IP con cualquier dispositivo podemos acceder a todo el sistema de control, en la figura siguiente se observa el logo del software HTML seleccionado.

Siguiendo en la figura que continua también se muestra un ejemplo de datos que son importantes, que deben ser procesados por el software y mediante una dirección IP a demás podemos acceder a todo el sistema de control.



*Figura 62. Software HTML*

Fuente: Web(<https://geoinnova.org/blog-territorio/html-css-y-javascript-lenguajes-para-el-desarrollo-de-paginas-web/>)

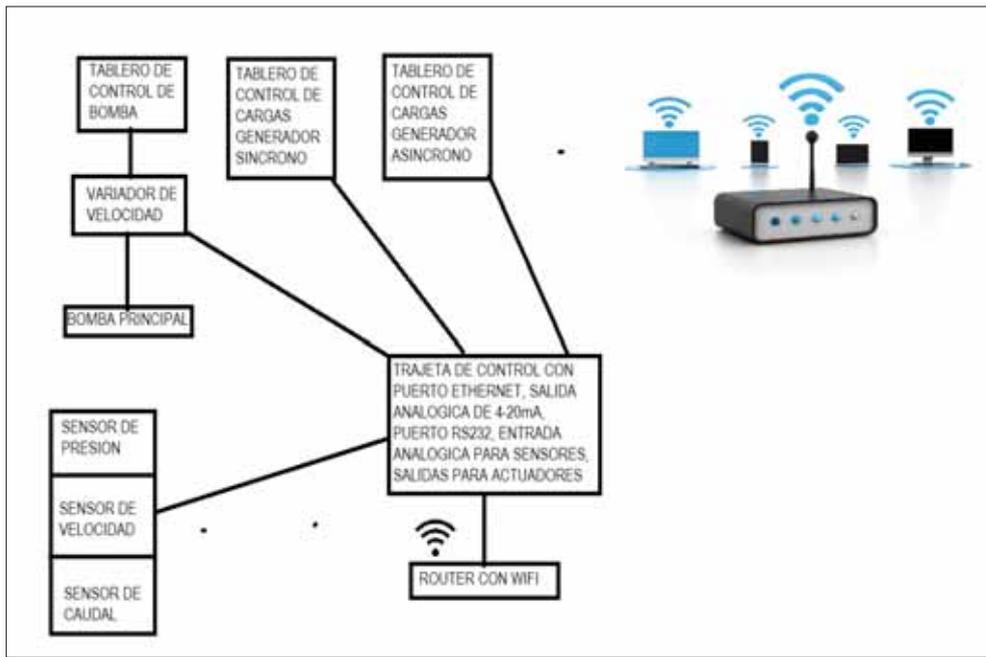


Figura 63. Sistema de control HTML

Fuente: Web(<https://geoinnova.org/blog-territorio/html-css-y-javascript-lenguajes-para-el-desarrollo-de-paginas-web/>)

#### 4.2.8 Diseño de diagramas de flujo para la implementación del sistema SCADA para el banco de pruebas.

Para este diseño anteriormente ya tenemos definido el software y red de comunicación a utilizarse, que anteriormente se menciona, y en la figura finalmente observamos un diseño de diagrama de flujo para implementar en el sistema SCADA.

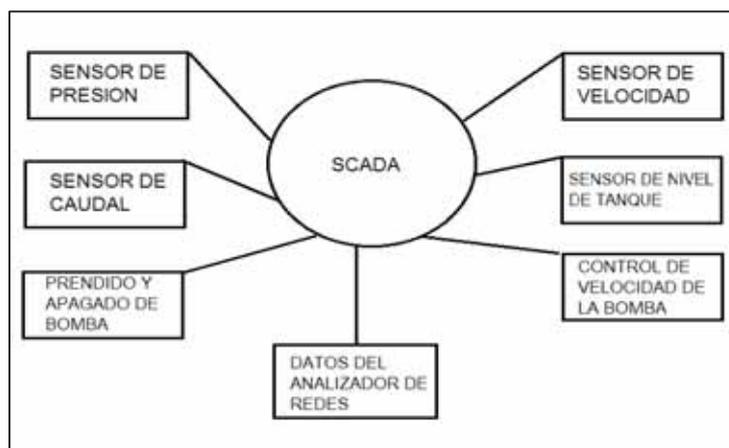


Figura 64. Diseño de diagrama de flujo para la implementación del sistema SCADA para el banco de pruebas.

Fuente: Web (<https://www.cursosaula21.com/que-es-un-sistema-scada/>)

#### 4.2.9 Instalación de los tableros de control.



Figura 65. Tableros de control de todo en banco de pruebas.

Fuente: propia.

De la figura 65 podemos describir que la imagen comprende tableros instalados en el siguiente orden:

##### 4.2.9.1 Tablero de Control con PLC.

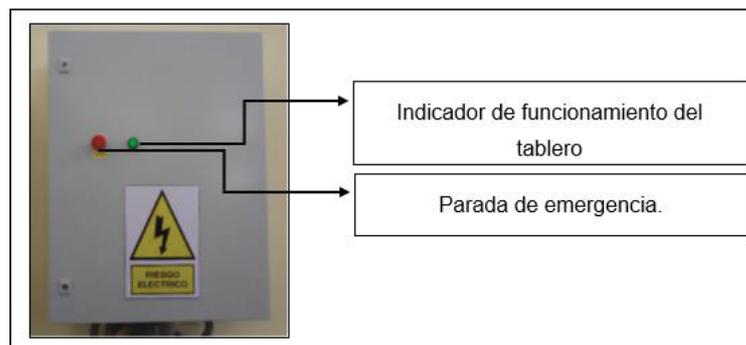


Figura 66. Tablero de control con PIC.

Fuente: propia.

El tablero de control con PLC Interiormente esta implementado de los siguientes dispositivos como se observa en la siguiente figura:

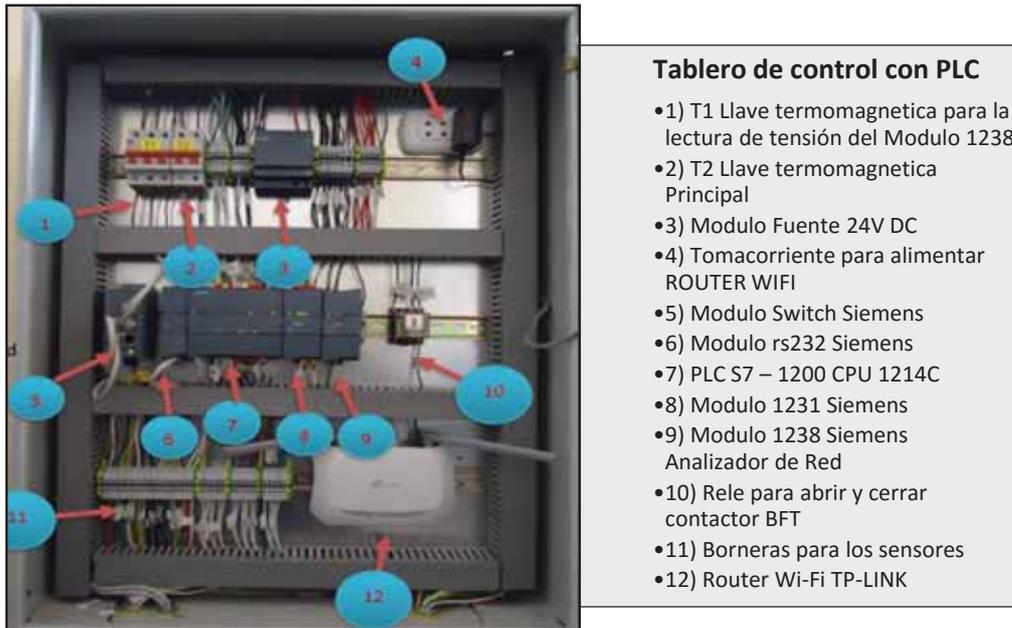


Figura 67. Implementos del Tablero de control con PLC.

Fuente: propia.

#### 4.2.9.2 Tablero de control del banco turbina generador THC.

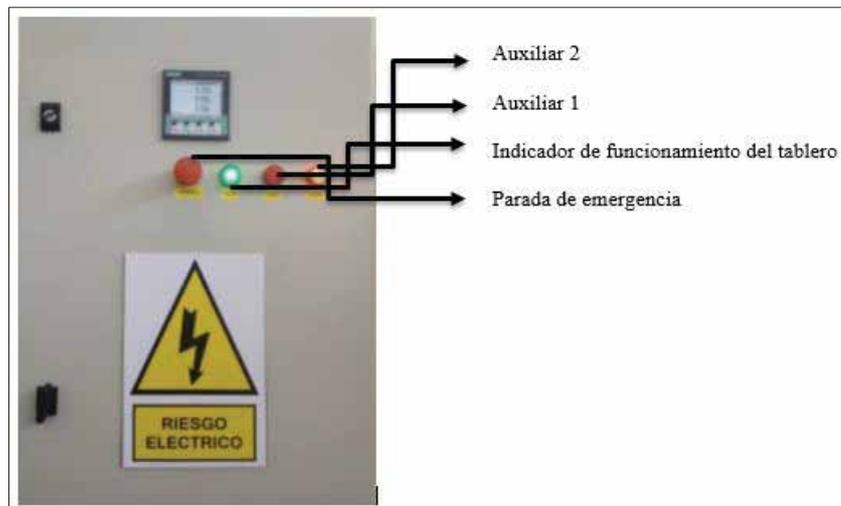


Figura 68. Tablero de control del THC.

Fuente: propia.

En la figura siguiente se muestra de igual forma la implementación del tablero de control de grupo THC.

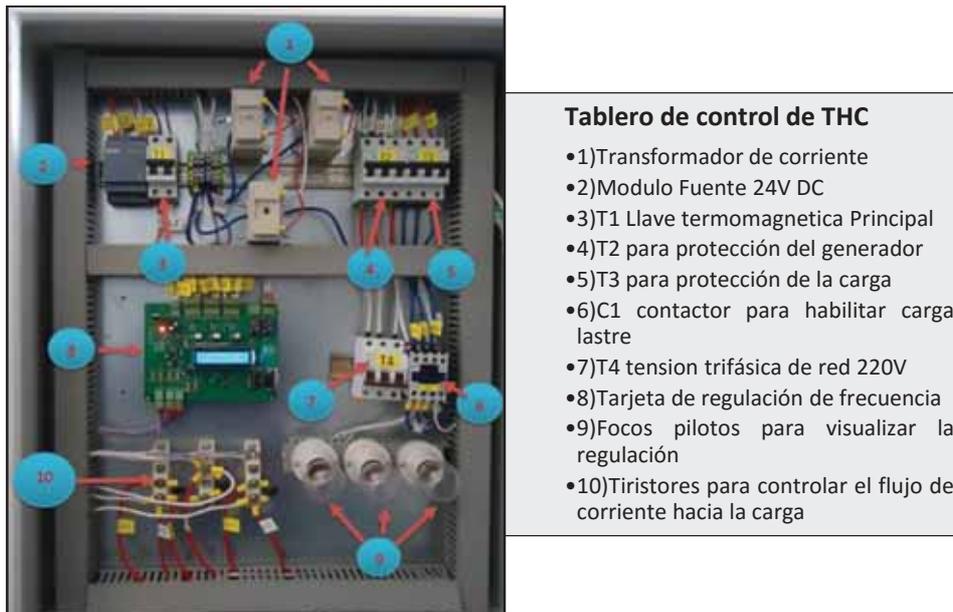


Figura 69. Implementación del tablero de control del THC.

Fuente: propia.

#### 4.2.9.3 Tablero de control dl banco bomba generador BFT.

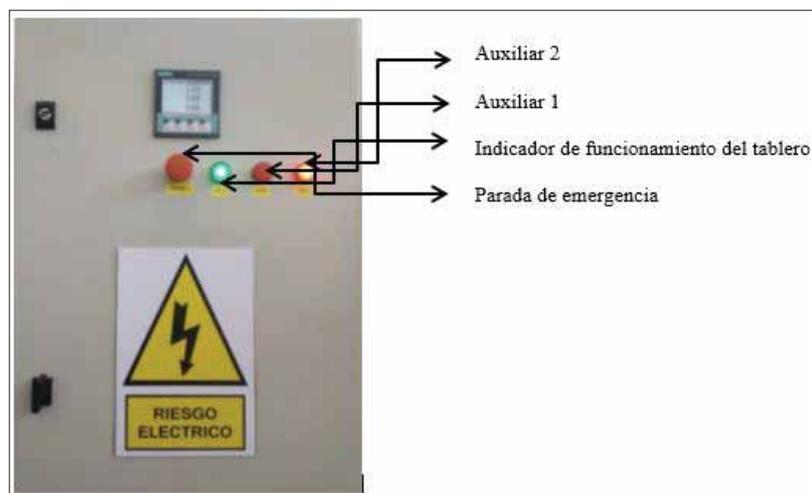


Figura 70. Tablero de control de BFT

Fuente: propia.

Finalmente, en la figura siguiente se muestra la parte interior del tablero de control de BFT.

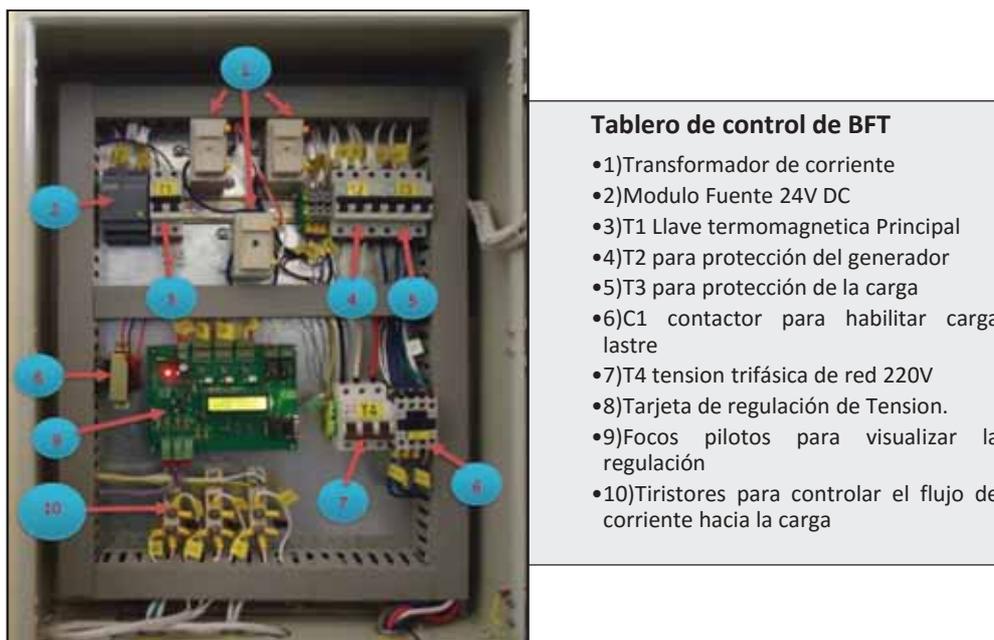


Figura 71. Implementos del tablero de control de BFT

Fuente: propia.

#### 4.2.9.4 Instrumentos de medición

##### Módulo de entradas analógicas para medición de energía.

- Denominación: SM1238 Energy Meter 480VAC.
- Descripción: SIMATIC S7-1200, entrada analógica, SM 1238 Energy Meter 480V AC, módulo de medición de energía para la captura de parámetros eléctricos en redes monofásicas y trifásicas (TN, TT) de hasta 480V AC; rango de corriente: 1A, 5A; captura de tensiones, corrientes, ángulos de fase, rendimientos, valores energéticos, frecuencias; diagnóstico de canal.



Figura 72. Módulo de entradas analógicas SM1238

Fuente: Siemens.

### Analizador de Redes.

- Denominación: SENTRON PAC3200
- Descripción: Fuente de alimentación multirango AC/DC Alimentación con 95 a 240 V AC  $\pm 10\%$  / 50 / 60 Hz ó 110 a 340 V DC  $\pm 10\%$ .



Figura 73. Analizador de redes SENTRON PAC3200

Fuente: Siemens.

#### 4.2.9.5 Sistemas de protección implementados y por implementar

##### Implementados:

Se observa los elementos de sistemas de protección en la figura 71, la cual se enumera:

- T1 Llave termomagnética Principal (3)
- T2 para protección del generador (4)
- T3 para protección de la carga (5)
- T4 tensión trifásica de red 220V (7)
- Tarjeta de regulación de Tensión (8)

##### Por implementar:

- Relé de protección
- Relé de Frecuencia
- Relé de máxima y mínima tensión

#### 4.2.9.6 Tablero de control General.



Figura 74. Tablero general del banco de pruebas.

Fuente: propia.

#### 4.2.10 Instalación del MAG.

Según el manual WEG, el MAG deben ser instalada en un local que sea de fácil acceso para inspeccionar y realizar su previo mantenimiento.

la instalación de los dos bancos de pruebas compuesta por el motor, bomba generador y turbina, en la instalación del motor y todo el banco serán instalados en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la escuela profesional de ingeniería mecánica.

En cuanto a la atmosfera no existen vapores gases, polvaredas peligrosas, inflamables o combustibles ofreciendo posibilidad de fuego o explosión. Nuestro motor estará a libre circulación del aire de ventilación.

El ambiente del local de la instalación del MAG deberá tener condiciones de renovar el aire por lo menos de 20 m<sup>3</sup> por minuto por cada 100 kW de potencia de la máquina. Para nuestro MAG será de 1.5 m<sup>3</sup> por minuto renovar el aire, entonces llevando a la velocidad del aire de la ciudad del cusco obtenidas del sunami la velocidad del aire es de 2 m/s, llevando nuestro resultado 1.5 m<sup>3</sup> por minuto a la misma unidad con que nos brinda el SENAMHI será de 0.0125 m<sup>2</sup>.

##### 4.2.10.1 Aspectos Mecánicos

**4.11.1.1 fundaciones:** las fundaciones donde será colocado el MAG deben ser planas y, si es posible, exentos de vibraciones. Por la recomendación del manual de instalaciones de motores WEG nuestra fundación es de concreto y metálico. Además, su elección de nuestra fundación escogido depende de la naturaleza del suelo de nuestro local de

instalación o de resistencia de los. “En el dimensionamiento de las fundaciones del motor debe ser considerado el hecho de que el motor puede, ocasionalmente, ser sometido a un torque mayor que el torque nominal. Si este dimensionamiento no fuese criteriosamente ejecutado podrá ocasionar serios problemas de vibración del conjunto fundaciones-motor y maquina accionada”. Para evitar los problemas de vibración en el banco de pruebas sus fundaciones, como también en la maquina accionada, tomamos muy en cuenta este dato muy importante, por lo tanto en la base de concreto deberá ser prevista una placa metálica para apoyo del perno de nivelamiento si el caso el motor gira en el sentido de rotación horaria normal, pero en el caso que gire en el sentido contrario (4.Cmax) sentido anti horario, se tendrá que tomarse varias alternativas como se muestra en las figuras siguientes.

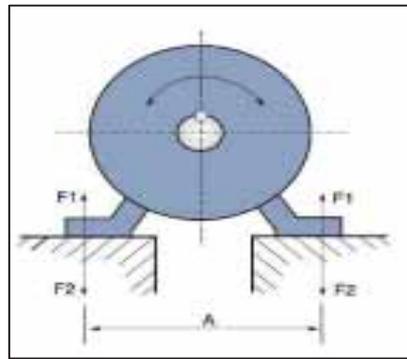


Figura 75. Fundaciones del motor.

Fuente: (WEG, Motores, 2001)

Los esfuerzos  $f_1$  y  $f_2$ , sobre la fundación se calculan a través de las siguientes ecuaciones.

$$F_1 = +0.5. m. g + \frac{(4C_{max})}{(A)}$$

$$F_2 = +0.5. m. g - \frac{(4C_{max})}{(A)}$$

Donde:

$F_1$  y  $F_2$  : Son esfuerzos de los pies sobre la base (N).

$G$  : Es aceleración de la gravedad ( $9.81m/s^2$ ).

$M$  : Es la masa del motor (kg).

$C_{max}$  : Es el torque máximo (Nm).

$A$  : Se obtiene del dibujo dimensional del motor ( $m^2$ ).

Ahora para el tipo y tamaño de las fundaciones, resaltes y reentrancias, tornillos de anclar con placas de anclar sueltas o fijas en el concreto lo obtenemos por el tamaño de nuestro MAG el cual se instala.

Según diámetro del tornillo M10 podemos calcular.

#### 4.2.10.1.1 tipos de base

**base concreto** o fijadas en el concreto: como vimos en los anteriores en la base de los motores están más utilizado bases de concreto para acomodar.

**Base metálica:** a los pies del motor nuestra base metálica plana llamado reservorio apoyado sobre vigas, esto con el fin de evitar deformaciones en la carcasa. Nuestra base nivelada será en la propia fundación, para ello usamos nivel de burbujas, después de esto se verifica los tornillos soportes apretados y los acoples verificados, la base metálica apoyado sobre vigas y los tornillos soportes son concretados correctamente, en la figura 74 observemos la base de instalación de nuestro MAG.



*Figura 76. Base metálica de reservorio a los pies del MAG apoyado sobre vigas*

Fuente: propia.

#### 4.2.10.1.2 Alineamiento o Nivelamiento

Según varios autores cuando el acoplamiento es directo la maquina eléctrica se debe alinear perfectamente con la maquina accionada. Un alineamiento imperfecto puede ocasionar vibraciones, defectos en diferentes partes de la maquina por ejemplo en los rodamientos, y hasta ruptura del eje. Una forma de lograr un alineamiento correcto es utilizando relojes comparadores.

En el caso de nuestra instalación el alineamiento se realiza con un calibrador de ajustes y una regla de acero, desde que los acoples este perfectos y centrados.

En las siguientes ilustraciones veamos los ajustes a tomas en cuenta.

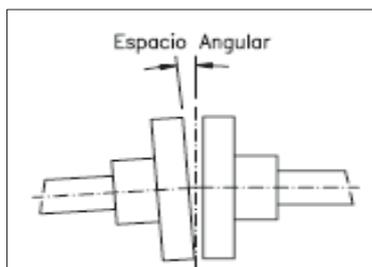


Figura 77. Ajuste angular (paralelismo).

Fuente: (WEG, Motores, 2001).



Figura 78. Ajuste radial (concentricidad).

Fuente: (WEG, Motores, 2001).

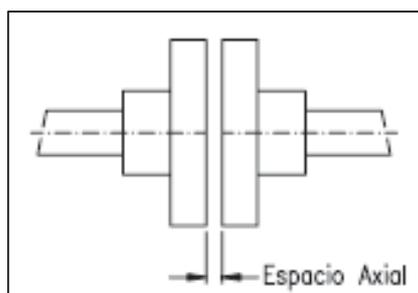


Figura 79. Ajuste axial

Fuente: (WEG, Motores, 2001).

#### 4.2.10.1.3 Acoplamientos.

- Acoplamiento directo.
- Acoplamiento por engranaje.
- Acoplamiento por medio de poleas y correas.

En nuestra instalación del acoplamiento del MAG con la turbina (bomba centrífuga) el acoplamiento se realiza por faja y polea, debido al costo, lugar de instalación donde ocupa menor espacio y es usada por la necesaria relación de velocidades, veamos en la siguiente figura que muestra en acoplamiento del MAG.

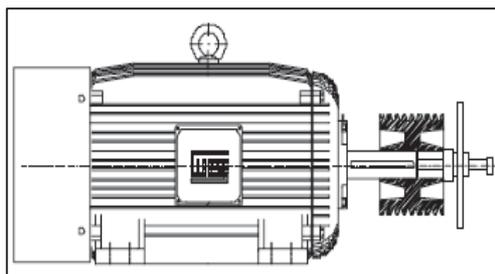


*Figura 80. Acoplamiento del MAG por correa.*

Fuente: propia.

#### **4.2.10.1.4 Montaje de poleas.**

Para el montaje de poleas del MAG se rasgó de la chaveta y agujero con rosca en la punta, luego la polea es encajada hasta la mitad del rasgo de la chaveta. Para ejes sin agujero con rosca se recomienda calentar la polea hasta 80°C veamos en la figura siguiente.

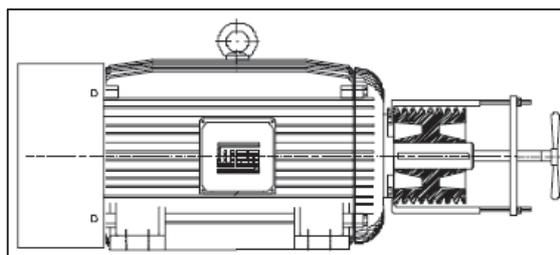


*Figura 81. Montaje de poleas.*

Fuente (WEG, Motores, 2001, pág. 12)

#### **4.2.10.1.5 Desmontaje de poleas.**

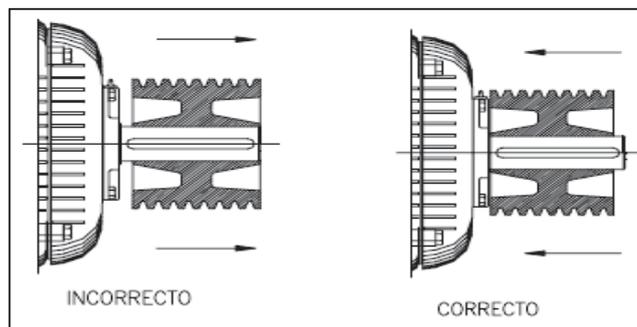
Para desmontar las poleas del MAG se recomienda el uso de un dispositivo que tenga la función requerida, de esta forma desmontamos con mucho cuidado para no dañar la chaveta y el asiento de la polea.



*Figura 82. Desmontaje de la polea.*

Fuente (WEG, Motores, 2001, pág. 12)

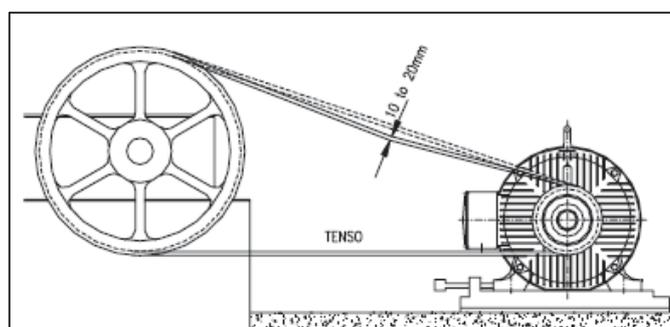
El posicionamiento correcto de la polea lo ilustramos en la siguiente figura 81.



*Figura 83. Posicionamiento correcto de poleas.*

Fuente (WEG, Motores, 2001, pág. 12)

En el funcionamiento de las poleas deben ser evitados los esfuerzos radiales desnecesarios en los cojinetes, las poleas tienen que estar perfectamente alineadas, el deslice de la correa puede ser evitado por esto el correcto alineamiento de las poleas y también con aplicación de un material resinoso, como la brea. Para la tensión en la correa debe ser suficiente para evitar el patinado durante el funcionamiento. Veamos en la siguiente figura.



*Figura 84. tensiones en la correa.*

Fuente (WEG, Motores, 2001, pág. 12)

La correa con exceso de tensión aumenta el esfuerzo en la punta del eje, causando vibración y fatiga, pudiendo llegar a quebrar el eje.

## CAPITULO V

### 5 PRUEBAS DE LABORATORIO

#### 5.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo de servir de guía para el estudiante de la facultad de ingeniería eléctrica electrónica informática y mecánica de la universidad nacional de san Antonio abad del cusco y también para profesionales que quieran experimentar los fenómenos electromagnéticos que se presentan en la maquinas asíncronas especialmente la del motor WEG MOD TE1BFXO# rotor jaula de ardilla de 7.5 kW de potencia, que ha sido seleccionado para esta práctica.

Dado que los equipos electromagnéticos a usarcé son máquinas reversibles de un coste considerable, su utilización debe ser bajo pruebas realizadas anteriormente por laboratorio de fábrica, y además se debe seguir las instrucciones que se expondrán en este capítulo desarrollado.

Los instructivos tienen el objetivo de guiar y orientar en las acciones correctas para evitar el daño o accidentes de, los usuarios del laboratorio del banco de pruebas que contiene dos grupos de generación que trabajan a una tensión de 220V de red trifásico. Siendo este nivel de voltaje peligroso, por ello es importante indicar que nosotros el grupo de investigación seguir la respectiva instrucción con la supervisión de instructor o profesor guía.

Las pruebas realizadas son pruebas realizadas del banco no convencional, con el uso del motor como generador y la bomba como turbina, esto permitirá observar los datos y lecturas obtenidas durante el desarrollo de las prácticas y analizar las ventajas y desventajas de cada banco de pruebas según su comportamiento.

#### 5.2 Normas y Procedimientos

**Tema:** Normas de seguridad y procedimientos de trabajo para el manejo del banco de pruebas.

**Objetivos:**

- Guiar al estudiante de laboratorio en el manejo seguro para el uso experimental de los fenómenos electromagnéticos que se representan en las maquinas asíncronas.
- Determinar las normas de seguridad básica para evitar accidentes.

- Conocer las normas de seguridad básica para la manipulación del banco de pruebas.

### **Normas de Seguridad**

1. Se debe de usar ropa adecuada para este trabajo.
2. NO usar en el cuerpo piezas de metal, ejemplo, cadenas, relojes, anillos, etc. ya que podrían ocasionar un corto circuito.
3. Cuando se trabaja cerca de partes con corriente o maquinaria, usar ropa ajustada y zapatos antideslizantes.
4. De preferencia, trabajar sin energía.
5. Calcular apropiadamente el amperaje de la red para la protección de la misma y de los aparatos conectados, (cables, breques, cuchillas, fusibles, termomagnéticos).
6. Es conveniente trabajar con guantes adecuados cuando se trabaja cerca de líneas de alto voltaje y proteger los cables con un material aislante.
7. Mejor prevenir que lamentar, cuando manipulamos una red eléctrica de cualquier voltaje, nunca está de más verificar que se haya cortado correctamente el suministro eléctrico.
8. Deberán abrirse los interruptores completamente, no a la mitad y no cerrarlos hasta estar seguro de las condiciones del circuito.
9. Si se desconoce el circuito o si es una conexión complicada, familiarizarse primero y comprobar la red con las medidas de seguridad antes mencionadas.
10. Hacer uso de herramientas adecuadas ( barras aisladoras ) para el manejo de interruptores de alta potencia.

### **Marco Procedimental:**

- Evitar el contacto en la parte posterior del tablero cuando este encendido, debido a que existe una fuente de voltaje trifásica, que ocasiona un riesgo eléctrico.
- Antes de realizar algunas modificaciones o ajustes en la parte posterior del tablero, asegúrese de desconectar la fuente principal de alimentación del tablero (desconectando el interruptor de circuito).

- Realizar la inspección de los cables de conexión que deben estar en perfecto estado antes de iniciar cualquier otra acción.
- Revisar los interruptores y seccionadores del tablero de prueba a usar, todos deben de estar apagados mostrando en su posición OFF.
- Revisar que los breakers del tablero de control general del banco de pruebas del laboratorio estén en posición OFF, en caso de que presente diferente posición encuentre las razones y solucionar.
- Asegurarse de que el breakers del tablero de control de BFT, del tablero de control THC este en posición apagado OFF, antes de iniciar cualquier maniobra y pruebas a realizar.
- Asegurarse que las maquinas rotativas estén instalados correctamente y en perfecto estado.
- Verificar que las válvulas de control de caudal estén cerradas.
- Finalmente para realizar pruebas en el laboratorio con el banco de pruebas asegúrese haber prendido correctamente desde el tablero general hasta los tableros de control de cada grupo de generación usar.

**Recursos Utilizados:**

- Tablero de control BFT.
- Motor WEG.
- Bomba centrifuga.
- Capacitores.
- Carga.
- PC

## 5.3 Pruebas de Laboratorio

### 5.3.1 Prueba 01

**Tema:** Prueba SIN CARGA del MAG.

**Objetivos:**

Visualizar y registrar los datos obtenidos de los variables eléctricos del MAG sin carga por medio de los diferentes dispositivos colocados dentro y fuera del tablero del banco de pruebas BFT.

Analizar y evaluar los datos registrados mediante curvas.



Figura 85. Velocidad del generador en Vacío con respecto al tiempo

Fuente: Propia

En la gráfica se observa la velocidad del Generador sin carga es muy superior a la velocidad síncrona, además se puede decir que esta prueba duro solamente 11 segundos como máximo debido que el controlador de la velocidad actuó y paro la máquina, para prevenir el embalamiento.

Tabla 11. Valores mínimos, medianos y máximos sin carga

NIVEL DE CARGA	VALOR DE VARIABLE	V (V)	I (A)	P (W)	RPM
SIN CARGA	mínima	230	0	0	2536
	media	239	0	0	2581
	máxima	250	0	0	2605

Fuente: Propia

Por la programación en el tablero de control para controlar el voltaje se permite hasta una tensión de 250 V, además la corriente y la potencia generada son nulas.

### 5.3.2 Prueba 02

**Tema:** Prueba con carga variable

**Objetivo:**

Visualizar y registrar los datos obtenidos de los variables eléctricos del MAG con carga variable por medio de los diferentes dispositivos colocados dentro y fuera del tablero del banco de pruebas BFT.

Evaluar el comportamiento de las variables eléctricas

### Desarrollo de la Prueba:

Para esta prueba se ha variado la carga de una cocina eléctrica de tres hornillas con diferentes rangos de potencia en cada hornilla, como se detalla:



*Figura 86. Variación de posiciones para cada hornilla*

Fuente: Propia.

Primera prueba la hornilla 1 está en la posición 0, la hornilla 2 en la posición 1 y la hornilla 3 en la posición 1. Esta carga se denomina Carga 1 (0-1-1) que es la carga mínima.

Segunda prueba la hornilla 1 está en la posición 1, la hornilla 2 en la posición 1 y la hornilla 3 en la posición 1. Esta carga se denomina Carga 2 (1-1-1).

Tercera prueba la hornilla 1 está en la posición 1, la hornilla 2 en la posición 1 y la hornilla 3 en la posición 2. Esta carga se denomina Carga 3 (1-1-2).

Cuarta prueba la hornilla 1 está en la posición 1, la hornilla 2 en la posición 2 y la hornilla 3 en la posición 2. Esta carga se denomina Carga 4 (1-2-2).

Quinta prueba la hornilla 1 está en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 2 y la hornilla 3 en la posición 2. Esta carga se denomina Carga 5 (2-2-2).

Sexta prueba la hornilla 1 está en la posición 3, la hornilla 2 en la posición 2 y la hornilla 3 en la posición 2. Esta carga se denomina Carga 6 (3-2-2).

Séptima prueba la hornilla 1 está en la posición 3, la hornilla 2 en la posición 3 y la hornilla 3 en la posición 2. Esta carga se denomina Carga 7 (3-2-2) que es la carga media.

Octava prueba la hornilla 1 está en la posición 3 la hornilla 2 en la posición 3 y la hornilla 3 en la posición 3. Esta carga se denomina Carga 8 (3-3-3) que es la carga media.

Novena prueba la hornilla 1 está en la posición 4, la hornilla 2 en la posición 3 y la hornilla 3 en la posición 3. Esta carga se denomina Carga 9 (4-3-3).

Decima prueba la hornilla 1 está en la posición 5, la hornilla 2 en la posición 3 y la hornilla 3 en la posición 3. Esta carga se denomina Carga 10 (5-3-3).

Onceava prueba la hornilla 1 está en la posición 6, la hornilla 2 en la posición 3 y la hornilla 3 en la posición 3. Esta carga se denomina Carga 11 (6-3-3) que es la carga máxima.

De las pruebas se ha recolectado datos que se muestra en los anexos.

#### Análisis:

Para este análisis se considera carga mínima, carga mediana y carga máxima

De la primera prueba para carga 1 (0-1-1): CARGA MÍNIMA

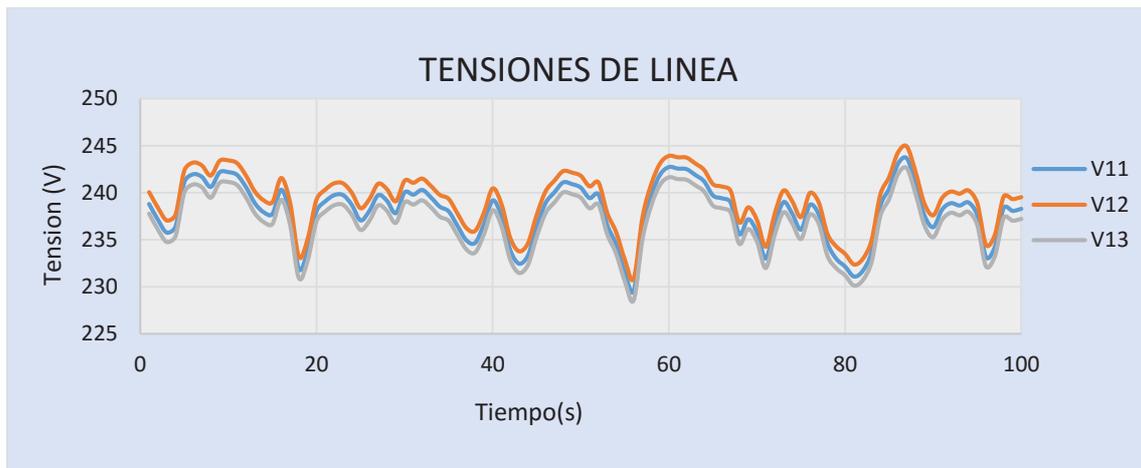


Figura 87. Tensiones de línea a carga mínima

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que las tensiones de línea con carga mínimo son elevadas que la tensión nominal de 220V. esto indica que cuando más menor sea la carga la tensión será mayor.



Figura 88. Corrientes de línea a carga mínima

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que las corrientes de línea con carga mínima las corrientes son máximos.

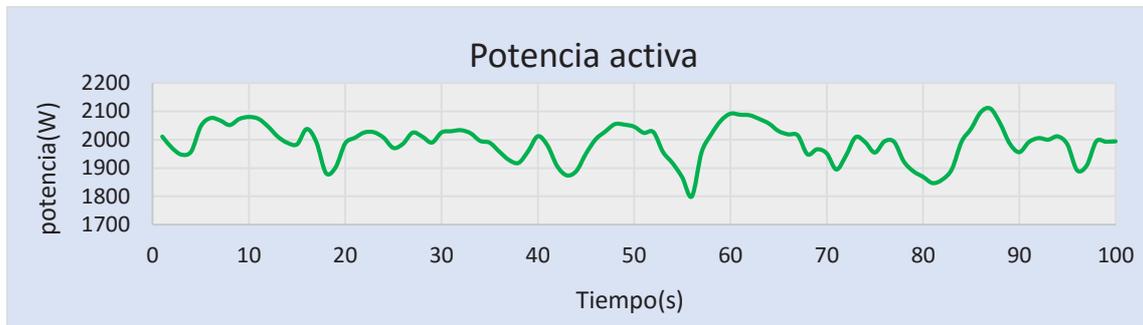


Figura 89. Potencia activa con carga mínima.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que la potencia es directamente proporcional a la tensión y corriente esto indica el mismo comportamiento que la tensión y corriente. De la figura anterior se observa que a menor carga la velocidad es mayor.

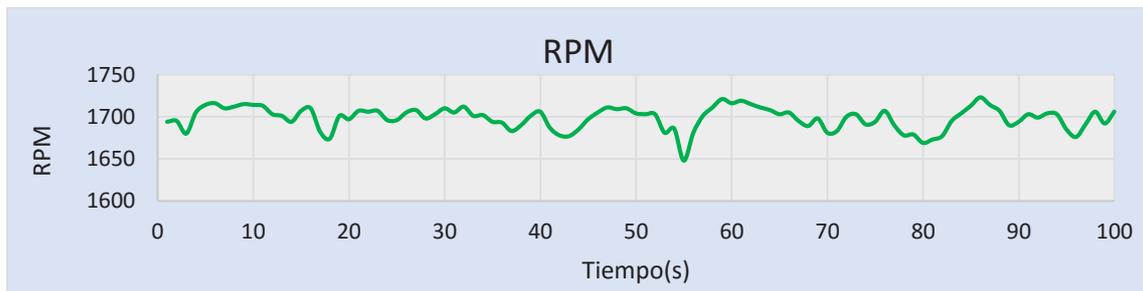


Figura 90. Velocidad del generador con carga mínima

Fuente: Propia.

De la sexta prueba para carga 6 (3-2-2): CARGA MEDIANA



Figura 91. Tensiones de línea con carga mediana.

Fuente: Propia.

Se observa en la figura anterior que las tensiones de línea son medianas con una carga mediana. Con lo cual se deduce que la tensión disminuye según que la carga aumenta.

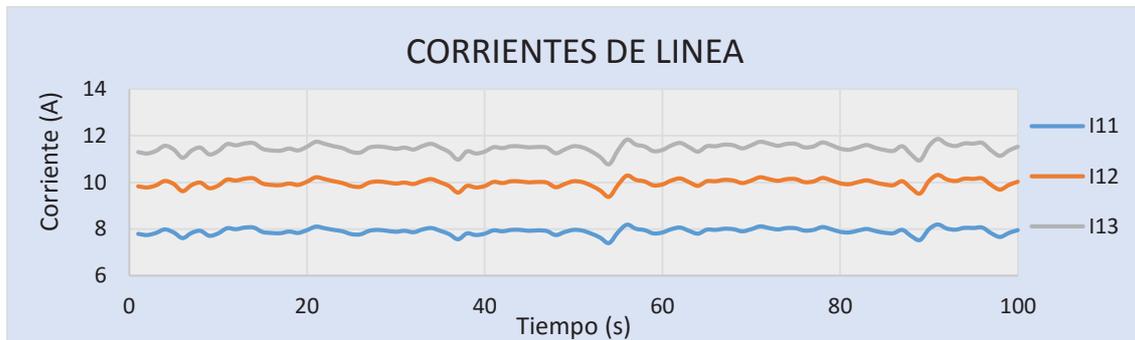


Figura 92. Corrientes de línea para carga mediana

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que las corrientes de línea con carga mediana las corrientes son medianas.



Figura 93. Potencia Activa con carga mediana

Fuente: Propia.

En la figura anterior la Potencia Activa con carga mediana se observa el mismo comportamiento que vimos en las anteriores figuras.

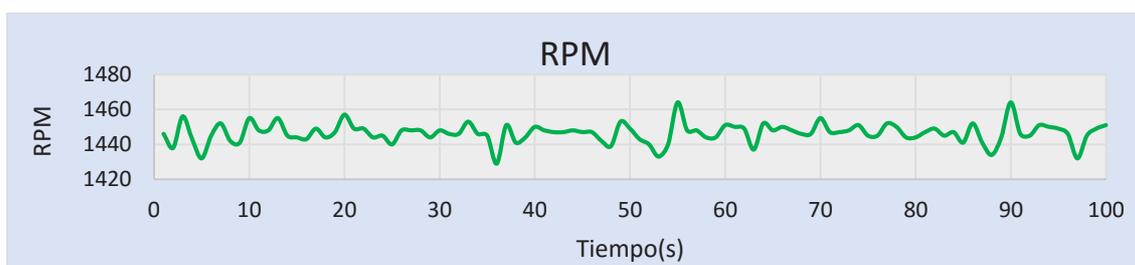


Figura 94. Velocidad de la bomba a carga mediana

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que la velocidad de la bomba a carga mediana la velocidad disminuye con respecto a la de la carga mínima.

De la onceava prueba para carga 11 (6-3-3): CARGA MÁXIMA



Figura 95. Tensiones de línea con carga máxima.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que las tensiones de línea con cargas máximas van disminuyendo a medida que la carga aumenta.



Figura 96. Corrientes de línea a carga máxima

Fuente: Propia.

En la figura anterior observamos a cargas máximas las corrientes de línea van disminuyendo.



Figura 97. Potencia Activa con cargas máximas

Fuente: Propia.

En la figura anterior observamos que la potencia activa va disminuyendo proporcionalmente con la tensión a cargas máximas.

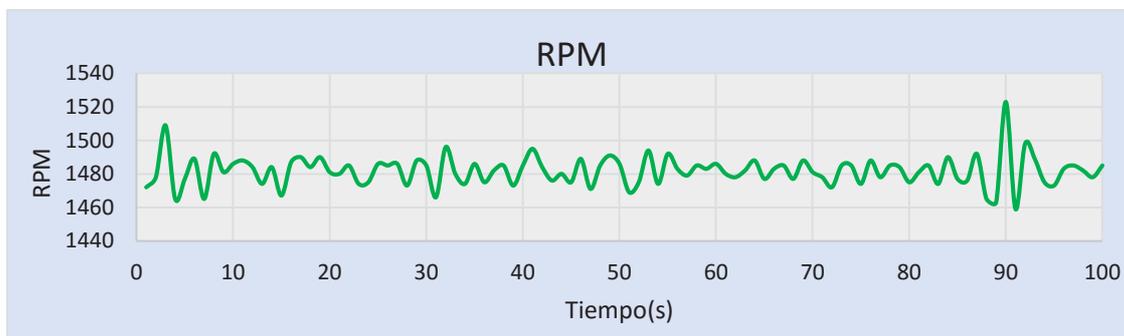


Figura 98. Velocidad con carga máxima

Fuente: Propia.

En la figura anterior observaremos que la velocidad va disminuyendo a medida que la carga aumenta, en este caso a cargas máximas la velocidad disminuye.

Resumiendo de la prueba 02 con carga variable se muestra en el cuadro siguiente:

Tabla 12. Valores mínimos, medianos y máximos para carga variable

NIVEL DE CARGA	VALOR DE VARIABLE	V11 (V)	V12 (V)	V13 (V)	I11 (A)	I12 (A)	I13 (A)	P1 (W)	RPM
CON CARGA MÍNIMA (0-1-1)	min	229.56	230.85	228.57	14.91	15.71	16.42	1800.41	1648.00
	med	237.96	239.22	236.90	15.79	16.62	17.36	1989.15	1698.47
	max	243.67	244.94	242.61	16.39	17.24	18.00	2109.24	1723.00
CON CARGA MEDIANA (3-2-2)	min	145.88	146.78	143.30	7.40	9.38	10.78	691.08	1429.00
	med	154.18	155.03	151.35	7.90	9.98	11.47	772.52	1446.48
	max	158.75	159.59	155.92	8.19	10.32	11.86	822.40	1464.00
CON CARGA MÁXIMA (6-3-3)	min	99.08	101.32	96.88	4.98	8.28	9.79	403.44	1459.00
	med	108.56	110.90	106.07	5.55	9.12	10.82	480.99	1481.70
	max	112.77	115.19	110.15	5.77	9.48	11.25	519.46	1523.00

Fuente: Propia.

### 5.3.3 Prueba 03

**Tema:** Prueba de velocidad variable a carga constante del MAG.

**Objetivo:**

Visualizar y registrar los datos obtenidos de los variables eléctricos del MAG a velocidad variable con carga constante por medio de los diferentes dispositivos colocados dentro y fuera del tablero del banco de pruebas BFT.

Evaluar el comportamiento de las variables eléctricas

#### **Desarrollo de la Prueba:**

Para esta prueba se ha variado la velocidad desde la bomba madre con diferentes rangos de frecuencia a carga constante, como se detalla:

Primera prueba se selecciona una frecuencia de la bomba madre a 35 Hz, la posición seleccionada de cada hornilla es de la siguiente manera, la hornilla 1 en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 0.5 y la hornilla 3 en la posición 1.5. Esta carga se denomina Carga (2-0.5-1.5) se toma como carga constante para esta prueba.

Segunda prueba se selecciona una frecuencia de la bomba madre a 40 Hz, la posición seleccionada de cada hornilla es de la siguiente manera, la hornilla 1 en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 0.5 y la hornilla 3 en la posición 1.5. Esta carga se denomina Carga (2-0.5-1.5) se toma como carga constante para esta prueba.

Tercera prueba se selecciona una frecuencia de la bomba madre a 45 Hz, la posición seleccionada de cada hornilla es de la siguiente manera, la hornilla 1 en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 0.5 y la hornilla 3 en la posición 1.5. Esta carga se denomina Carga (2-0.5-1.5) se toma como carga constante para esta prueba.

Cuarta prueba se selecciona una frecuencia de la bomba madre a 50 Hz, la posición seleccionada de cada hornilla es de la siguiente manera, la hornilla 1 en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 0.5 y la hornilla 3 en la posición 1.5. Esta carga se denomina Carga (2-0.5-1.5) se toma como carga constante para esta prueba.

Quinta prueba se selecciona una frecuencia de la bomba madre a 55 Hz, la posición seleccionada de cada hornilla es de la siguiente manera, la hornilla 1 en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 0.5 y la hornilla 3 en la posición 1.5. Esta carga se denomina Carga (2-0.5-1.5) se toma como carga constante para esta prueba.

Sexta prueba se selecciona una frecuencia de la bomba madre a 60 Hz, la posición seleccionada de cada hornilla es de la siguiente manera, la hornilla 1 en la posición 2, la hornilla 2 en la posición 0.5 y la hornilla 3 en la posición 1.5. Esta carga se denomina Carga (2-0.5-1.5) se toma como carga constante para esta prueba.

De las pruebas se ha recolectado datos que se muestra en el anexo N° 10

### Análisis:

Para este análisis se considera Velocidad mínima a 35 Hz, velocidad media a 45 Hz y Velocidad máxima a 60 Hz, considerando que la velocidad de la bomba turbina es similar a la bomba madre.

De la primera prueba para frecuencia 35 Hz: VELOCIDAD MÍNIMA



Figura 99. Tensiones de línea a velocidad mínima carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior tenemos las tensiones de línea mínimas a velocidad mínima carga constante.

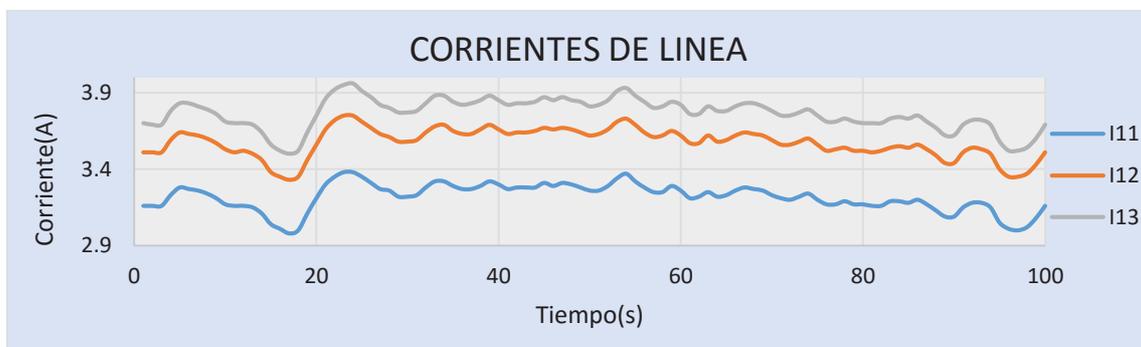


Figura 100. Corrientes de línea a velocidad mínima carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se muestra las corrientes de líneas mínimas a velocidad mínima carga constante.



Figura 101. Potencia activa a velocidad mínima carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se muestra la potencia activa mínima a velocidad mínima carga constante.

De la tercera prueba para frecuencia 45 Hz: VELOCIDAD MEDIA.

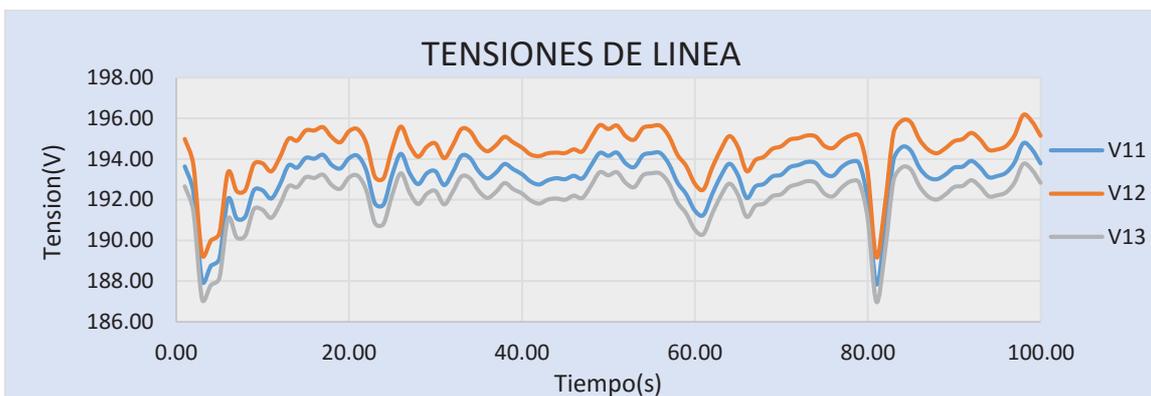


Figura 102. Tensiones de línea a velocidad media carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las tensiones de línea medias a velocidad media carga constante, a medida que la velocidad aumenta la tensión aumenta.



Figura 103. Corrientes de línea a velocidad media carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que las corrientes de línea van incrementado a medida que la velocidad aumenta.

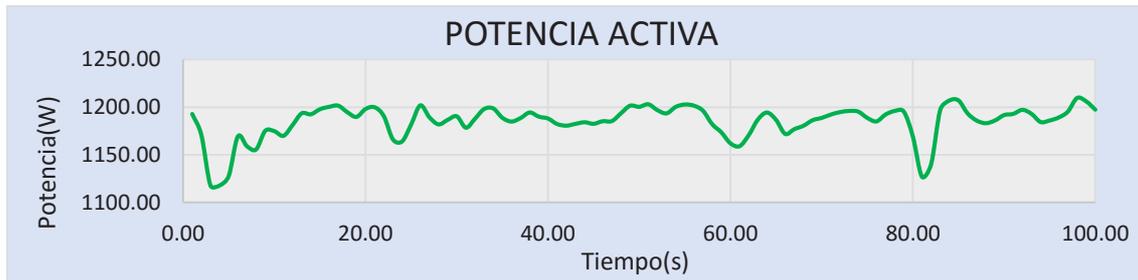


Figura 104. Potencia Activa a velocidad variable carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se muestra la potencia activa media a velocidad media carga constante.

De la sexta prueba para frecuencia 60 Hz: VELOCIDAD MÁXIMA.

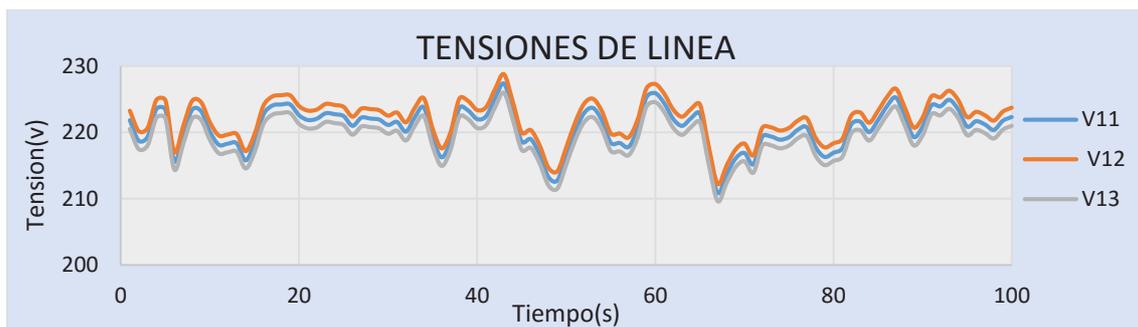


Figura 105. Tensiones de línea a velocidad máxima carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las tensiones de línea máximas a velocidades máximas con carga constante.



Figura 106. Corrientes de línea a velocidad máxima carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las tensiones de líneas máximas a velocidad máxima con carga constante.

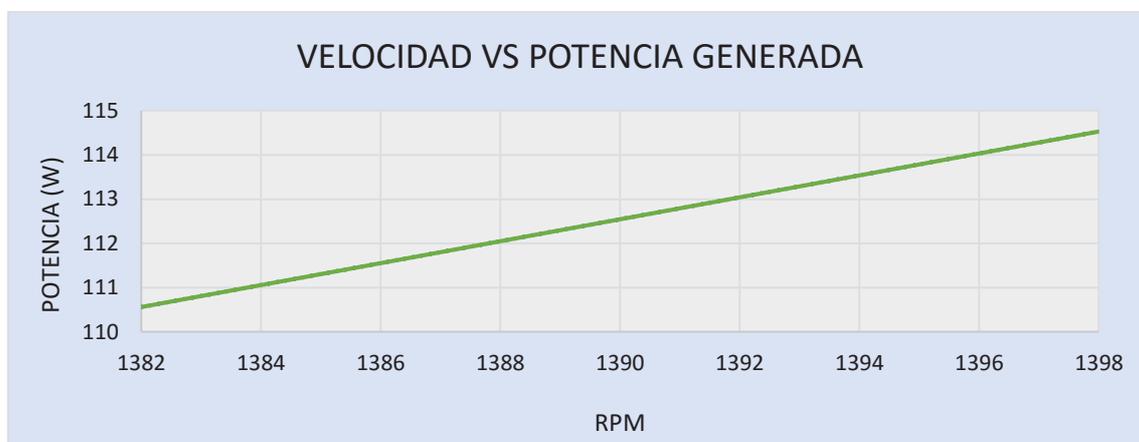


Figura 107. Velocidad vs potencia generada a velocidad variable

Fuente: Propia.

De la figura anterior podemos concluir que a medida la velocidad se incrementa la potencia crece.

De la prueba 03 se resume en el siguiente cuadro:

Tabla 13. Valores mínimos, medianos y máximos a velocidad variable

NIVEL DE VELOCIDAD	VALOR DE VARIABLE	V11 (V)	V12 (V)	V13 (V)	I11 (A)	I12 (A)	I13 (A)	P1 (W)	RPM
VELOCIDAD MÍNIMA (35Hz)	min	59.96	60.01	59.76	2.98	3.33	3.50	96.62	1382.00
	med	64.15	64.32	63.97	3.22	3.57	3.76	112.48	1389.74
	max	67.21	67.41	66.98	3.38	3.75	3.96	124.53	1398.00
VELOCIDAD MEDIANA (45 Hz)	min	187.85	189.18	186.98	10.89	11.69	12.41	1117.70	1535.00
	med	193.08	194.41	192.11	11.34	12.16	12.90	1184.99	1557.61
	max	194.78	196.16	193.75	11.49	12.32	13.07	1209.69	1566.00
VELOCIDAD MÁXIMA (60 Hz)	min	210.83	212.22	209.62	12.98	13.88	14.70	1482.58	1625.00
	med	220.63	222.04	219.34	13.92	14.87	15.73	1653.06	1668.80
	max	227.34	228.77	225.97	14.58	15.55	16.44	1776.45	1698.00

Fuente: Propia.

### 5.3.4 Prueba 04

**Tema:** Prueba de Caudal Variable con Carga Constante.

#### Objetivo:

Visualizar y registrar los datos obtenidos de los variables eléctricos del MAG a caudal variable con carga constante por medio de los diferentes dispositivos colocados dentro y fuera del tablero del banco de pruebas BFT.

Evaluar el comportamiento de las variables eléctricas

### Desarrollo de la Prueba:

Para esta prueba se ha variado el caudal con la válvula de entrada, a carga constante, como se detalla:

Primera prueba se selecciona un nivel 1 VÁLVULA ABIERTA de apertura a la válvula de entrada, a velocidad constante, carga constante (2-0.5-1.5).

Segunda prueba se selecciona un nivel 2 VÁLVULA SEMIABIERTA de apertura a la válvula de entrada, a velocidad constante, carga constante (2-0.5-1.5).

Tercera prueba se selecciona un nivel 3 VÁLVULA CERRADA de apertura a la válvula de entrada, a velocidad constante, carga constante (2-0.5-1.5).

De las pruebas se ha recolectado datos que se muestra en el anexo N° 11

### Análisis:

Para este análisis se considera Caudal mínima, Caudal media y Caudal máxima

De la primera prueba para nivel 1 válvula abierta: CAUDAL MÍNIMA



Figura 108. Tensiones de línea a caudal mínima carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las tensiones de línea mínimas a caudal mínima (válvula abierta) con carga constante.

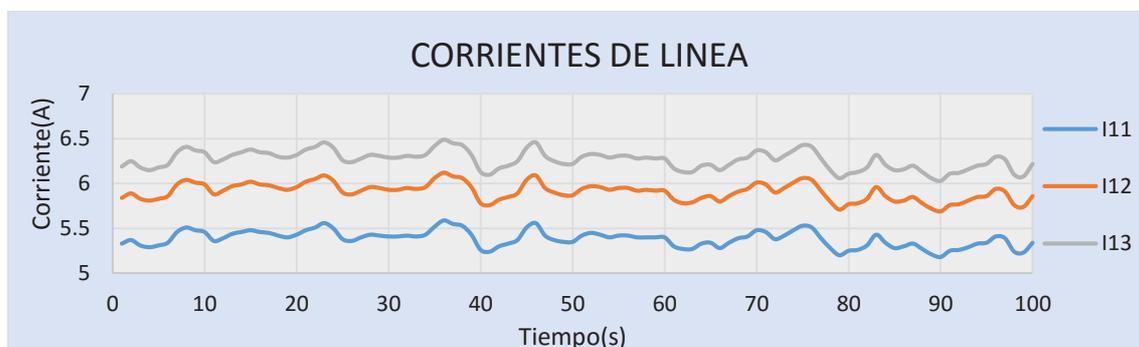


Figura 109. Corrientes de línea a caudal mínima carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se muestra las corrientes de línea mínimas a velocidad mínima (válvula abierta) con carga constante.

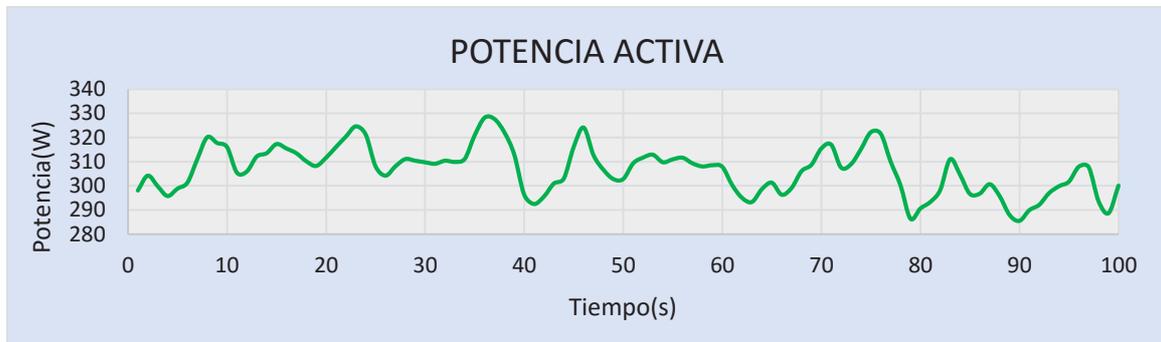


Figura 110. Potencia Activa a caudal mínima carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se muestra la potencia activa mínima a caudal mínimo (válvula abierta) con carga constante.

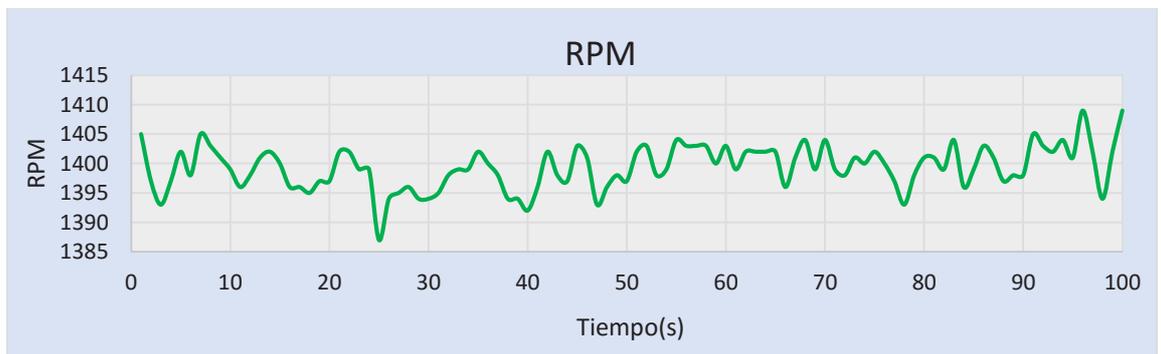


Figura 111. Velocidad a caudal mínima carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa la velocidad mínima a caudal mínimo (válvula abierta) con carga constante.

De la segunda prueba para nivel 2 válvula semiabierta: CAUDAL MEDIA

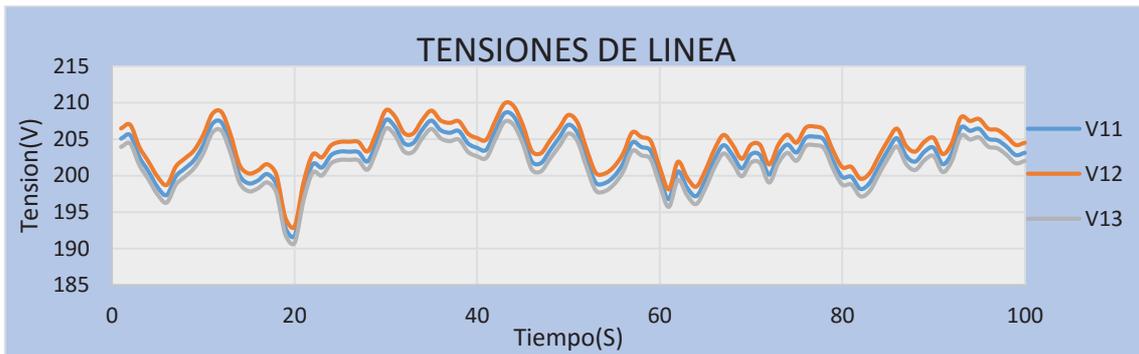


Figura 112. Tensiones de línea a caudal media carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las tensiones de línea medias a caudal media (válvula semiabierta) con carga constante.

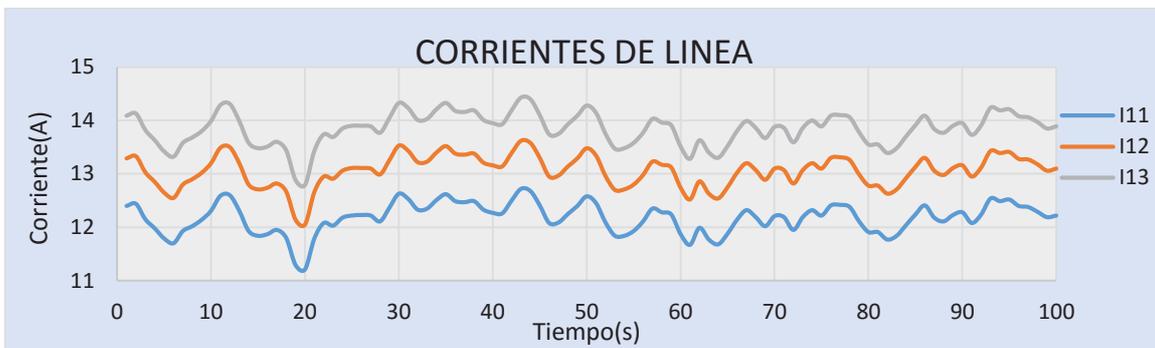


Figura 113. Corrientes de línea a caudal media carga constante.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las corrientes de línea media a caudal media (válvula semiabierta) con carga constante.

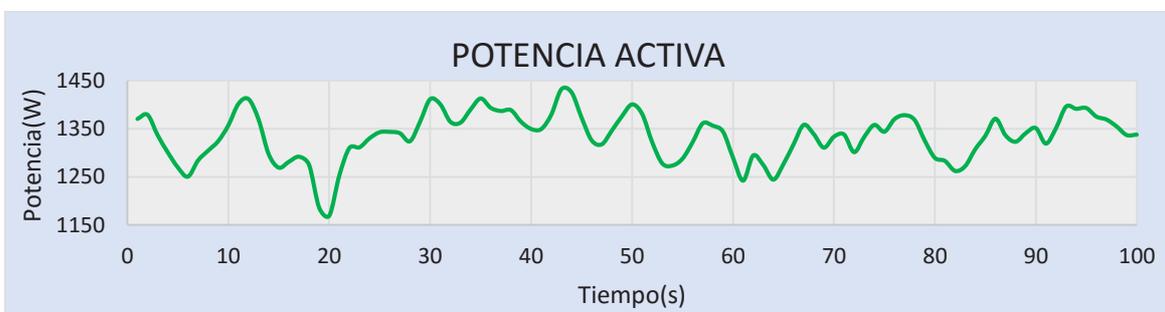


Figura 114. Potencia Activa a caudal media carga constate.

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa la potencia activa media a caudal media (válvula semiabierta) con carga constante.

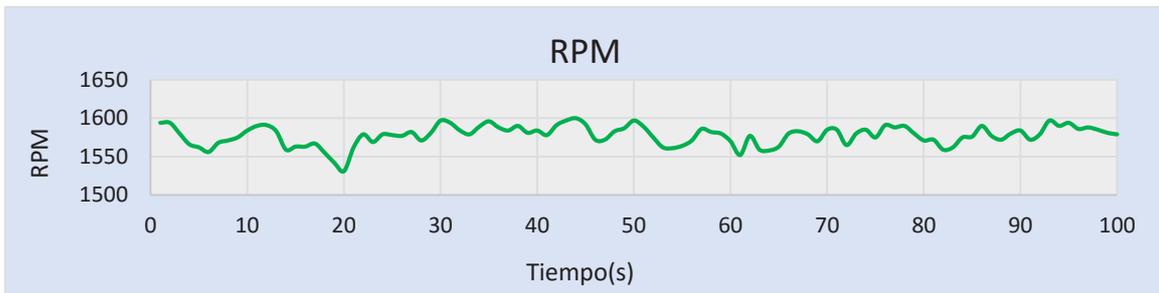


Figura 115. Velocidad a caudal media carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa la velocidad media a caudal media (válvula semiabierta) con carga constante.

De la Tercera prueba para nivel 3 válvula cerrada: CAUDAL MÁXIMO.

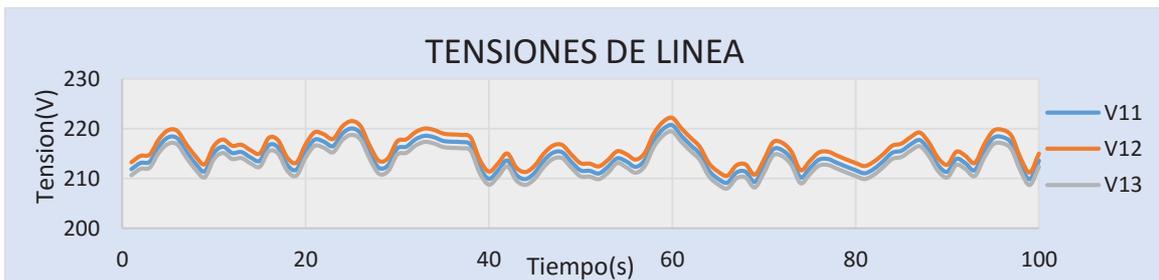


Figura 116. Tensiones de línea a caudal máximo carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa las tensiones de líneas máximas a caudal máxima (válvula cerrada) con carga constante.

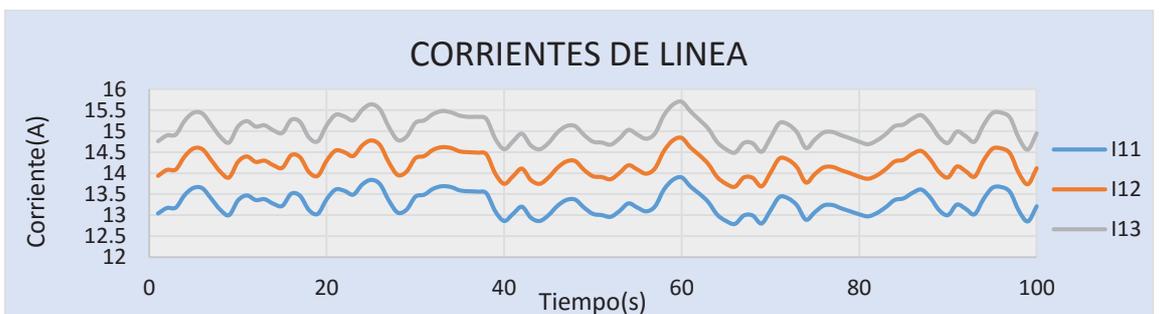


Figura 117. Corrientes de línea a caudal máxima carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que las corrientes de línea son máximas a caudal máxima (válvula cerrada) con carga constante.

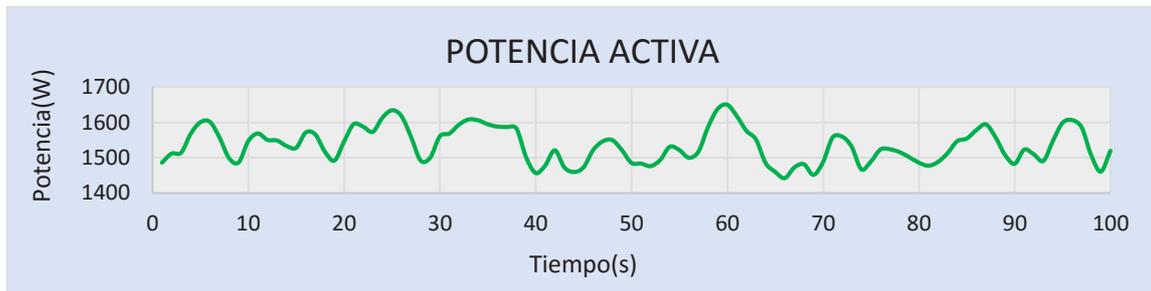


Figura 118. Potencia activa a caudal máximo carga constante

Fuente: Propia.

En la figura anterior se observa que la potencia activa es máxima a caudal máxima (válvula cerrada) con carga constante.

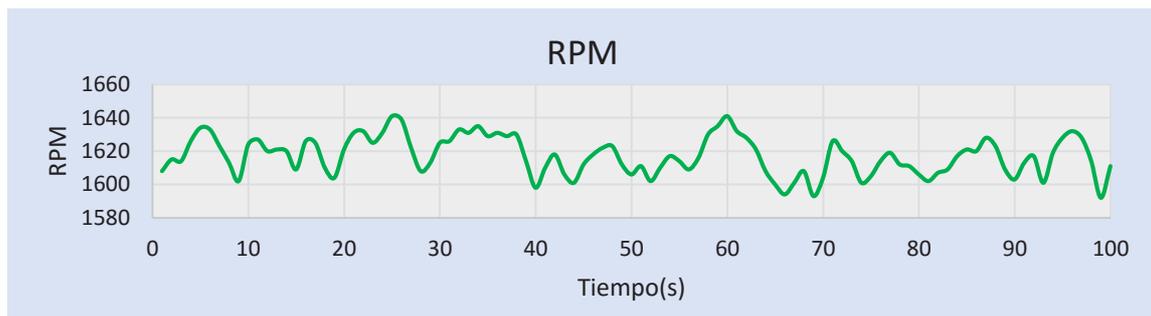


Figura 119. Velocidad a caudal máxima con carga constante

Fuente: Propia

En la figura anterior se observa que la velocidad es máxima cuando el caudal es máximo (válvula cerrada) con carga constante.

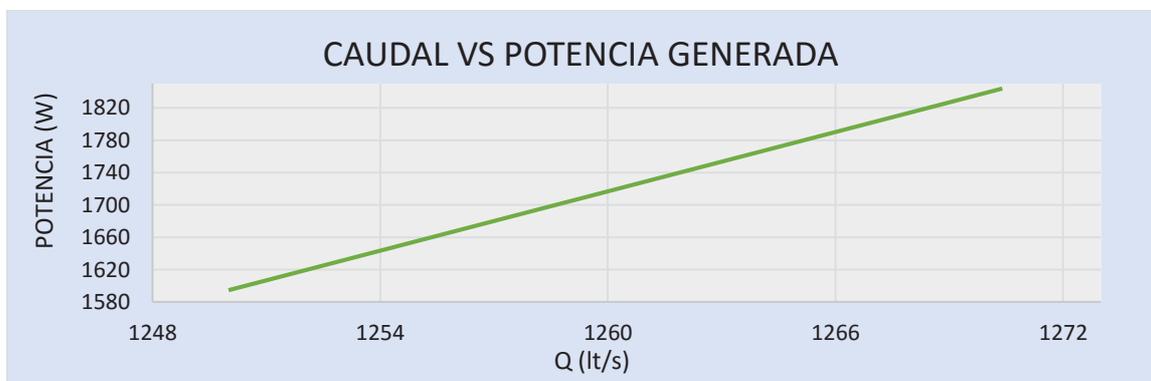


Figura 120. Caudal vs la Potencia Generada a caudal variable.

Fuente: Propia

De la figura anterior se concluye que la potencia tiende a crecer a medida que el caudal se incrementa.

De la prueba 06 se resume en el siguiente cuadro:

*Tabla 14. Valores mínimos, medianos y máximos a caudal variable.*

NIVEL DE VELOCIDAD	VALOR DE VARIABLE	V11 (V)	V12 (V)	V13 (V)	I11 (A)	I12 (A)	I13 (A)	P1 (W)	RPM	Q (L/min)
CAUDAL MÍNIMA (Válvula abierta)	min	100.07	100.80	99.63	5.18	5.69	6.03	285.52	1387.00	924.62
	med	103.51	104.31	103.06	5.38	5.91	6.26	306.59	1399.37	933.08
	max	107.00	107.81	106.49	5.59	6.12	6.49	328.15	1409.00	938.37
CAUDAL MEDIANA (Válvula semiabierta)	min	191.73	192.98	190.76	11.21	12.05	12.79	1169.31	1531.00	1208.33
	med	202.69	204.06	201.57	12.18	13.06	13.84	1334.43	1577.61	1230.95
	max	208.55	209.91	207.36	12.72	13.62	14.43	1432.36	1600.00	1245.08
CAUDAL MÁXIMA (Válvula cerrada)	min	209.17	210.57	207.99	12.79	13.68	14.49	1441.71	1592.00	1261.00
	med	214.39	215.82	213.17	13.29	14.20	15.03	1534.49	1617.22	1277.66
	max	220.72	222.17	219.43	13.90	14.84	15.70	1650.20	1641.00	1285.88

Fuente: Propia

### 5.3.5 Prueba 05

**Tema:** Prueba de carga RLC variable.

**Objetivo:**

Desarrollar pruebas de carga a fin de visualizar y registrar los datos del comportamiento del grupo hidroeléctrico completo, compuesto por la bomba turbina generador de inducción y tomar registro de datos haciendo trabajar a la bomba madre a diferentes frecuencia con cargas variables de acuerdo a la solicitud de carga, para obtener en tablero voltajes de 220 V y frecuencias de 60 Hz.

**Desarrollo de la Prueba:**

Para esta prueba se suministra agua a diferentes presiones a partir del incremento de frecuencia en la bomba madre que suministra el fluido agua, tal como se detalla:

- Se inicia la prueba a frecuencias de 45 Hz en la bomba madre y se va incrementado.
- Se mantiene la válvula tipo mariposa totalmente abierta al ingreso a la PAT.
- A medida que se va incrementando la frecuencia de la BM, se va incrementado las cargas resistivas hasta lograr el voltaje y la frecuencia de generación deseadas 220 V y 60 Hz en tablero de control eléctrico.

- Se toma datos primero con cargas totalmente resistivas R de acuerdo al cuadro mostrado.
- Se realizan pruebas con carga resistiva pura, con carga capacitiva e inductiva LC
- Se realizan pruebas con carga resistiva, capacitiva e inductiva RLC

### Análisis:

En el cuadro mostrado a continuación se muestran los parámetros de entrada de la bomba madre (BM) y los datos obtenidos en el tablero de control del grupo hidroeléctrico de generación:

*Tabla 15. Pruebas grupo hidroeléctrico con diferentes tipos de carga*

Prueba	Tipo de carga	Bomba Principal				Datos en la PAT			Parámetros hidráulicos		
		Hs (m)	Hz (Hertz)	V (Voltio)	Q (l/min)	V <sub>PAT</sub> (RPM)	Pe (bar)	Pe (m)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Ph (Watt)
1	R (3,0,5,0)	7.4	45	216.89	1073.06	1611	0.59	6.030	8.900	0.01788	1560.83
2	R (2,1,5,0)	7.4	50	217.05	1080.87	1631	0.58	5.928	8.800	0.01801	1554.52
3	R (1,2,0)	7.2	60	226.24	1107.06	1618	0.59	6.030	8.983	0.01845	1625.30
4	R (0,2,0)	6.7	55	227.08	1106.05	1626	0.49	5.008	7.915	0.01843	1570.22
5	RLC (6 L)	7.2	43	228.85	1014.90	1700	0.59	6.030	8.841	0.01692	1466.44
6	RLC (1,5,0,5, 0-10 L)	6.9	64	225.39	1093.03	1686	0.57	5.825	8.718	0.01822	1557.36
7	RLC (1,1,0,5-10L)	7.7	60	206.16	1086.66	1697	0.61	6.234	9.120	0.01811	1619.68
8	RLC (2,0,5,0-10L)	7.7	49	227.78	1092.01	1709	0.8	8.176	11.068	0.01820	1656.77
9	RLC (10 L)	8	45	228.17	1056.13	1748	0.66	6.745	9.599	0.01760	1975.24

Fuente: Propia

*Tabla 16. Datos de salida, tablero de control grupo hidroeléctrico.*

Datos de salida tablero de control Grupo Hidroeléctrico								
Vgen (RPM)	V (Voltio)	I (Amp)	Hz (Hertz)	P <sub>EE</sub> (Watt)	COS $\Theta$	$\eta_{ge}$	$\eta_{tras}$	$\eta_{sis}$ Eficiencia Ssit
1841	219.46	0.00	60.71	151.15	0.34	0.9	0.85	0.097
1864	218.99	2.44	62.15	214.23	0.35	0.9	0.85	0.138
1849	205.86	3.28	60.58	281.72	0.36	0.9	0.85	0.173
1858	204.05	3.30	60.84	282.06	0.38	0.9	0.85	0.180
1943	221.01	2.12	63.77	463.75	0.87	0.9	0.85	0.316
1927	213.11	3.30	62.06	570.37	0.73	0.9	0.85	0.366
1939	208.94	3.73	62.95	641.69	0.69	0.9	0.85	0.396
1953	215.13	3.79	63.78	735.16	0.75	0.9	0.85	0.454
1998	224.39	3.41	65.36	770.15	0.88	0.9	0.85	0.475

Fuente: Propia

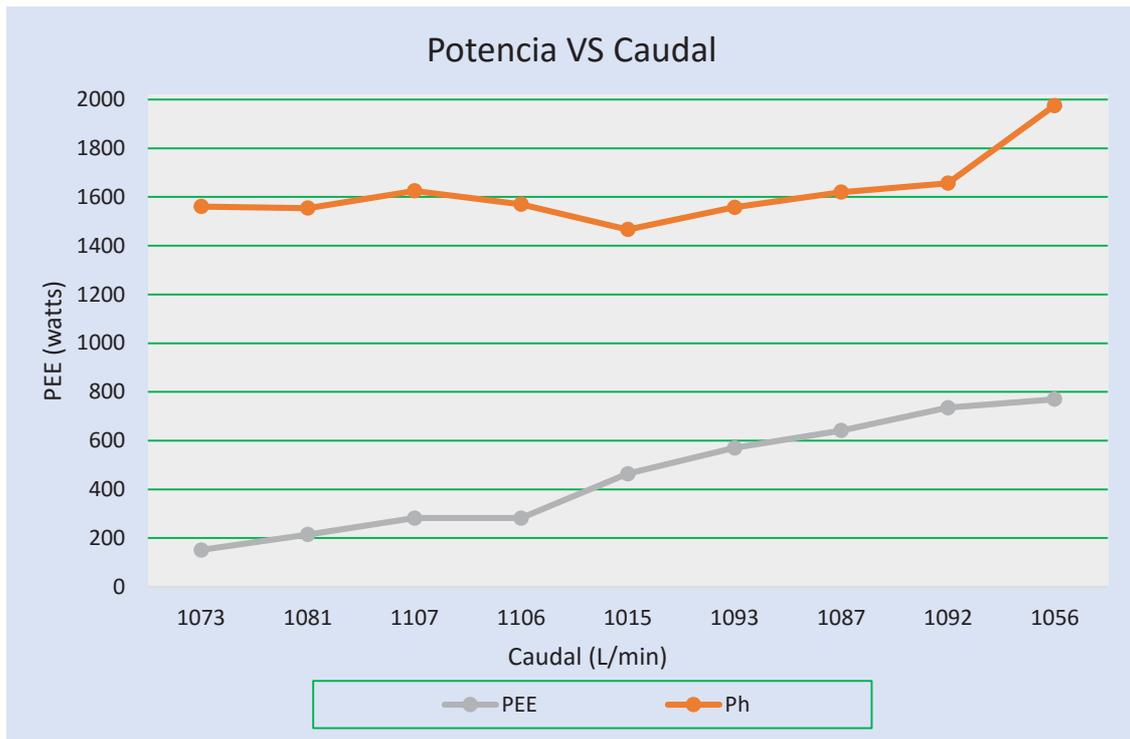


Figura 121. Potencia vs caudal

Fuente: Propia

En la figura anterior se observa que cada vez que se aumenta el caudal se podrá incrementar la potencia generada.

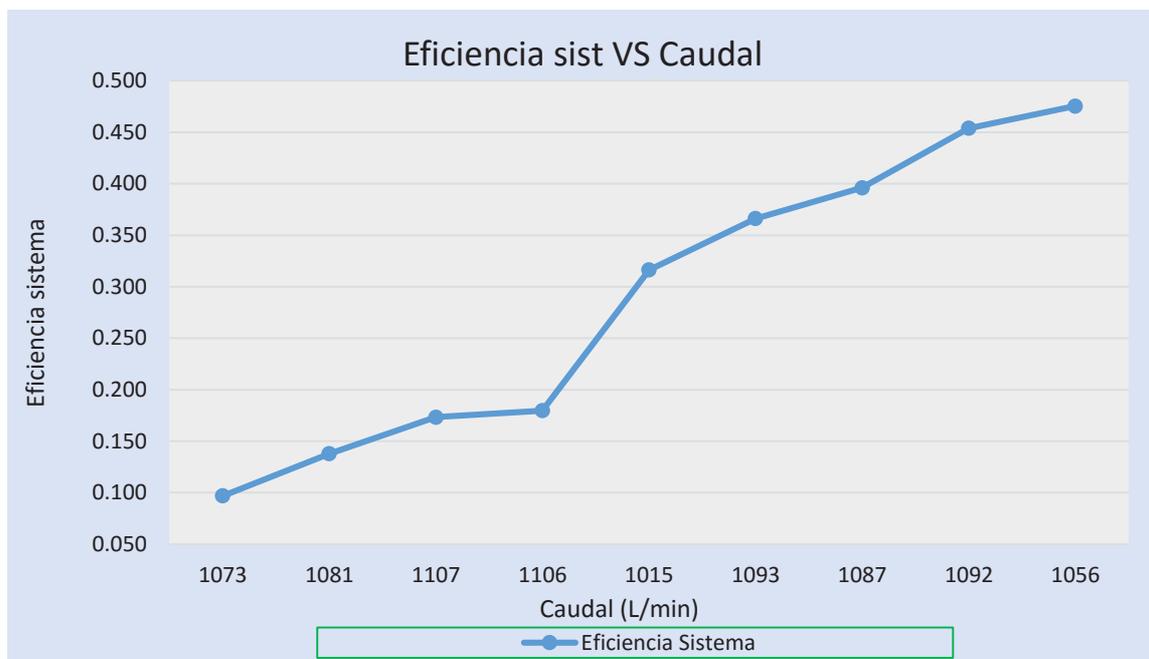


Figura 122. Eficiencia del sistema vs caudal.

Fuente: Propia

Como se observa en la anterior figura la eficiencia del sistema depende de la cantidad del caudal, cada vez que se aumenta el caudal la eficiencia del sistema incrementa.

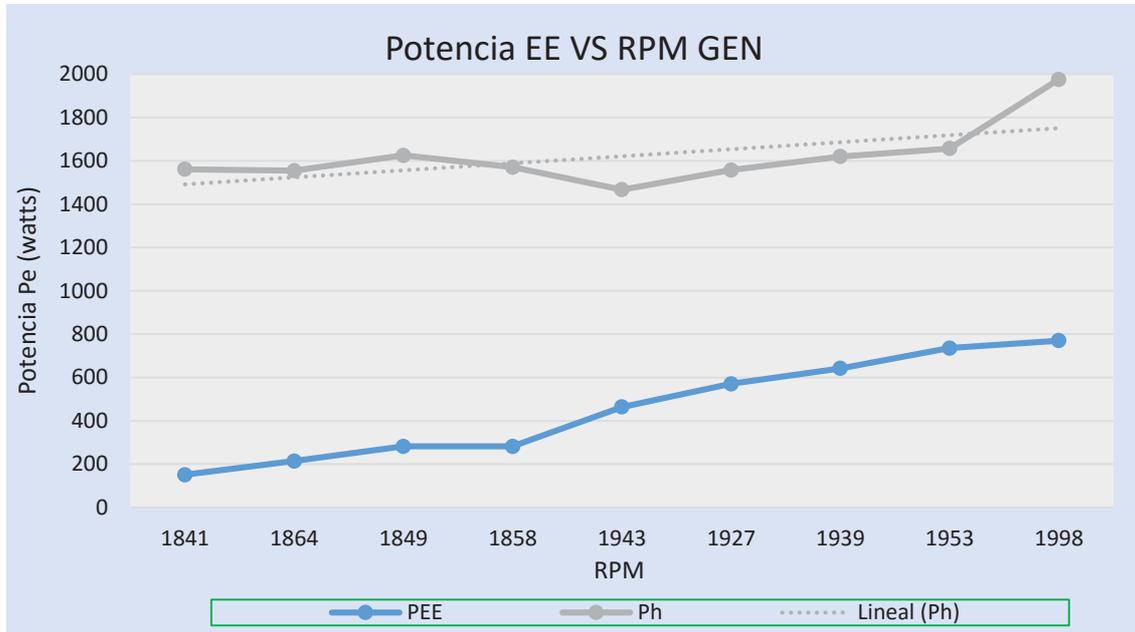


Figura 123. Velocidad vs la potencia

Fuente: Propia

En la figura anterior se observa que cada vez que se aumenta el caudal se podrá incrementar la RPM con lo cual también aumenta la potencia de generación.

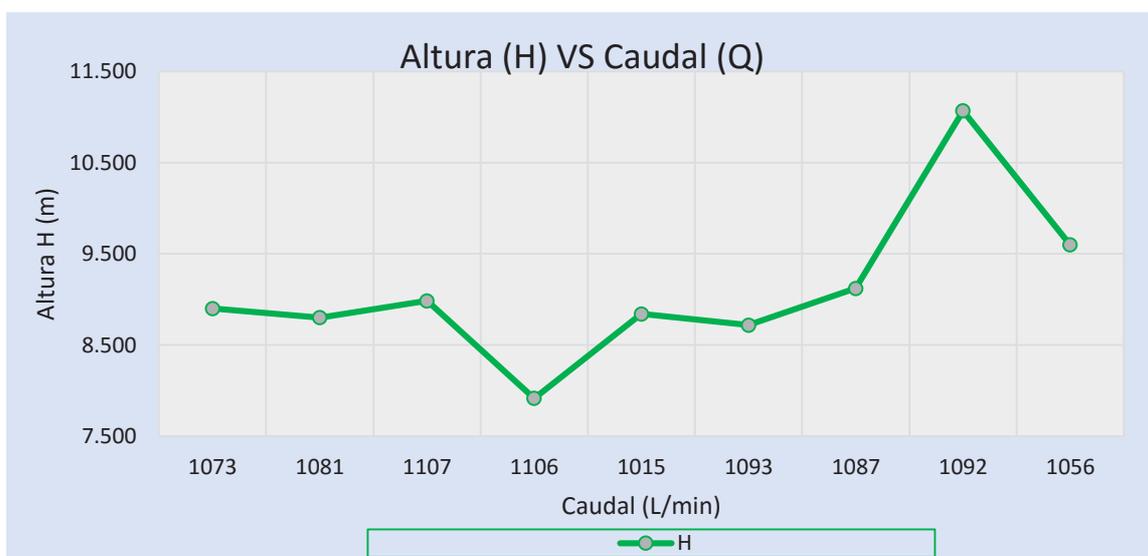
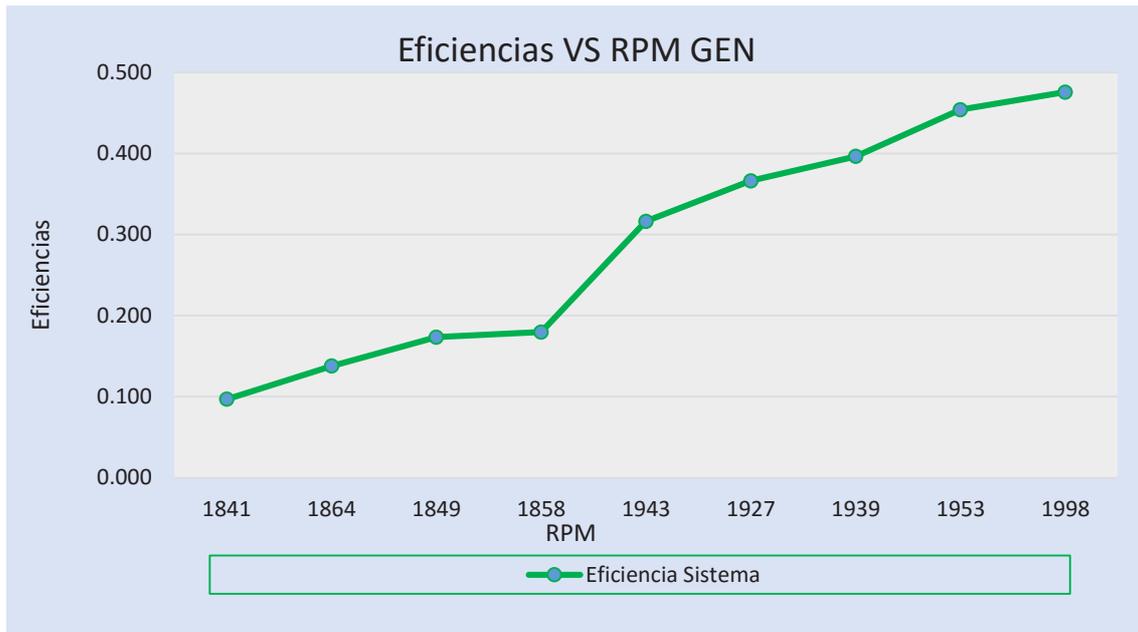


Figura 124. Altura vs el caudal

Fuente: Propia



*Figura 125. Eficiencia vs la velocidad*

Fuente: Propia

Se observa en la figura anterior que cada vez aumenta la RPM también se incrementa la eficiencia.

## CAPITULO VI

### 6 EVALUACIÓN ECONÓMICA

#### 6.1 Generalidades

El presente trabajo de investigación tecnológica comprende, en este último capítulo, el desarrollo de la evaluación económica del motor de inducción WEG de 7.5 kW de potencia, operando como generador eléctrico que ha sido evaluado mediante el uso de un banco de pruebas instalado en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica de nuestra Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, el cual comprende el metrado y presupuesto de los grupos de generación bomba turbina y motor de inducción como generador eléctrico y sistemas de control que será comparado en su nivel operativo con el grupo de generación turbina hidráulica y generador síncrono. Luego se evaluará su comportamiento de costos fijos de instalación y costos variables de operación como unidades instaladas, luego se efectuará una evaluación del costo de la energía generada en ambos grupos y referencialmente se comparará también con los costos de energía comercial de Electro Sur Este, para así conocer las ventajas técnicas económicas de la mejor alternativa seleccionada.

##### 6.1.1 Objetivo de la Evaluación Económica

El objetivo de la presente evaluación económico es determinar y comparar los costos de los grupos de generación por kilowatt instalado (US\$/kW<sub>i</sub>) y los costos de kilowatt hora generado (US\$/kW-hora) por los grupos hidroeléctricos analizados, analizando sus comportamientos y evaluando las mejores alternativas.

En el presente capítulo no se efectuará, el análisis económico a nivel de rentabilidad, por ser un proyecto a nivel de investigación académica.

##### 6.1.2 Alternativas de Generación

De acuerdo a los objetivos del proyecto se decidió instalar dos grupos de generación hidroeléctrica de baja potencia que tienen características diferentes y son los siguientes:

BFT

- Este grupo de generación comprende:
- Bomba centrífuga
- Motor eléctrico jaula de ardilla trifásica

THC

- Turbina Michelle Banki
- Alternador síncrono.

## **6.2 Presupuesto Base**

El presupuesto base del proyecto contempla el equipamiento de ambos grupos hidroeléctricos, tableros de control y desarrollo de pruebas, debemos indicar que los precios mostrados son precios de mercado puesto que se ha recurrido a la cotización de equipos.

### **6.2.1 Presupuesto base de Grupos de Generación**

La implementación de los grupos de generación, contempla la instalación de ambos grupos hidroeléctricos que están instalados en el laboratorio de máquinas hidráulicas de la escuela profesional de ingeniería mecánica

En la tabla 17 se observa costos de kW instalado de la bomba turbina PAT.

*Tabla 17. Metrado y Presupuesto de la micro central hidroeléctrica con bomba turbina de 7.5kW*

<b>M.C.H. BOMBA TURBINA 7.5 kW</b>						
<b>METRADO Y PRESUPUESTO</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Denominación (Grupo Hidroeléctrico)</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cant.</b>	<b>C. Unit</b>	<b>C. Parcial</b>	<b>C. Total</b>
1.1	Bomba centrifuga Pentax	Unid	1	7,500	7,500	
1.2	Motor jaula de ardilla	Unid	1	6,000	6,000	
1.3	Válvula mariposa de control	Unid	1	800	800	
1.4	Tablero de control y regulación	Unid	1	7,500	7,500	
1.5	Sistema de automatización	Unid	1	9,266	9,266	
1.6	Sistema de transmisión por fajas y poleas	Unid	1	1,250	1,250	
1.7	Bases metálicas, anclaje y accesorios	Global	1	1,200	1,200	
1.8	Cableado	Global	1	250	250	
<b>Total</b>						
Costo total S/						33,766.00
Costo total US\$						9,379.44
Costo de Grupo Hidroeléctrico (US\$)						9,379.44
Costo en US\$ de kW Instalado						1,250.59

Fuente: Propia

En la tabla 18 observamos los costos k W instalado del grupo turbina hidráulica.

*Tabla 18. Medrado y Presupuesto de la micro central hidroeléctrica con turbina hidráulica.*

<b>M.C.H. TURBINA HIDRÁULICA 7.5</b>						
<b>kW METRADO Y PRESUPUESTO</b>						
<b>Ítem</b>	<b>Denominación</b>	<b>Unid.</b>	<b>Cant.</b>	<b>C.Unit</b>	<b>C.Parcial</b>	<b>C.Total</b>
	Grupo Hidroeléctrico					
<b>1.1</b>	Turbina hidráulica Michell Banki	Unid	1	12,000	12,000	
<b>1.2</b>	Generador síncrono	Unid	1	8,200	8,200	
<b>1.3</b>	Válvula mariposa de control	Unid	1	800	800	
<b>1.4</b>	Tablero de control , regulación y carga lastre	Unid	1	8,800	8,800	
<b>1.5</b>	Sistema de automatización	Unid	1	9,267	9,267	
<b>1.6</b>	Sistema de transmisión por fajas y poleas	Unid	1	1,250	1,250	
<b>1.7</b>	Bases metálicas, anclaje y accesorios	Global	1	1,200	1,200	
<b>2.7</b>	Cableado	Global	1	250	250	
<b>Total</b>						41,767.00
<b>Costo total S/</b>						41,767.00
<b>Costo total US\$</b>						11,601.94
<b>COSTO DE GRUPO HIDROELÉCTRICO</b>			US\$	11,601.94		
<b>COSTO EN US\$ DE KW INSTALADO</b>				1,546.93		

Fuente: Propia

## **6.3 Evaluación de Costos Fijos y Costos Variables**

### **6.3.1 Costos Fijos**

Son aquellos costos que están directamente relacionados con el costo de la construcción y equipamiento, se debe considerar los siguientes aspectos:

a) Servicio de capital inmovilizado, o sea remuneración de capital y amortización del capital que considera los siguientes rubros:

-Interés: de bonos y dividendo de acciones incluyendo los intereses pasivos durante el período de construcción. Para nuestro caso podemos tomar interés anual de la banca comercial o banca de fomento entre 8% al 12%.

-Amortización: Se debe construir un fondo de amortización con el fin de establecer una reserva apta a renovar la planta en el momento que esta haya cumplido con su vida útil y quede inutilizada. Para este efecto consideramos una tasa de amortización del 2%.

b) Cargas tributarias: que tiene una incidencia mínima y no se tiene en cuenta para los cálculos, en todo caso la carga tributaria es asumida por el consumidor final.

c) Gastos de operación: incluye los sueldos herramientas, enseres, derechos de uso de agua etc. Para nuestro caso tomaremos una tasa del 1 %.

d) Gastos de Mantenimiento y renovación: que incluye el reemplazo periódico de las piezas desgastadas, y todas las actividades que incluyen el mantenimiento preventivo y correctivo planificado tanto en obras electromecánicas y obras civiles. Estos gastos aparecen a partir del segundo o tercer año de ejercicio alcanzando una tasa entre 1 a 2% anual.

La suma de los gastos fijos detallada acumula una tasa global del 15 al 17% que es aceptable en caso de centrales eléctricas.

### **6.3.2 Costos Variables**

dentro de los costos variables se consideran los siguientes aspectos:

a) Gastos por combustible utilizado: Este valor es importante en el costo de producción de las centrales térmicas, dependiendo del número de horas de utilización el costo influirá en la determinación del kilowatt hora (kWh) generado. En las centrales hidráulicas este costo se hace cero.

b) Gasto de lubricantes: comparados con los costos de combustibles el costo de los lubricantes es prácticamente despreciable.

c) Consumo específico de combustible: depende de la eficiencia del grupo a utilizar y del tipo de combustible, los grupos térmicos utilizan petróleo diésel 2, pero en las centrales hidráulicas este costo es cero.

d) El número de horas de utilización: depende del mercado y de las características de los consumidores de energía eléctrica.

### 6.3.3 Costos Totales

Los costos totales (gastos anuales) será la suma de los gastos fijos y variables. Los gastos fijos incluirán el costo total del central afectado por los coeficientes de interés y amortización y depreciación debiendo tomar en cuenta los gastos de reparaciones y mantenimiento programados. Los gastos de esta clase que corresponden a un año se suponen proporcionales al capital de la instalación.

$$Gf = P_{\max} * i * p \dots \dots \dots (6.1)$$

Donde:

$Gf$  : gastos fijos

$P_{\max}$ : potencia máxima de la central (kW)

$p$  : costo de la instalación por kW de potencia instalada (US\$/kW)

$i$  : coeficiente de interés y amortización de capital

Por otro lado, los gastos variables están relacionados al gasto de US\$ de combustible para producir 1 kWh y a la duración del aprovechamiento de la central durante un año definido por el número de horas de utilización, estos gastos están dados por la siguiente relación:

$$Gv = P_{\max} * c * h \dots \dots \dots (6.2)$$

Donde:

$c$  : costo de combustible en US\$/kW-hora

$h$  : número de horas de utilización anual (horas)

$P_{\max}$  : Potencia máxima de la central (kW).

Los gastos totales que erogan el funcionamiento de las centrales durante un año serán:

$$G = Gf + Gv = P_{\max} * i * p + P_{\max} * c * h \dots \dots \dots (6.3)$$

Si referimos los gastos totales a 1 kW de potencia instalada el gasto anual unitario en dólares por potencia instalada (US\$/kW) será:

$$\frac{G}{P_{\max}} = i * p + c * h \dots \dots \dots (6.4)$$

Si a la ecuación anterior la dividimos entre el número de horas de utilización anual el gasto en US\$ por kWh generado estará dado por:

$$g = \frac{G}{h * P_{\max}} = \frac{i * p}{h} + c \dots \dots \dots (6.5)$$

El análisis de la ecuación 6.4 llevados a gráficos nos permite evaluar la tendencia de la variación de los costos fijos y costos variables que eroga la implementación y operación de los dos tipos de centrales de generación que estamos evaluando. También podremos evaluar el comportamiento del costo del kWh generado con la ecuación 6.5 a lo largo de un período dependiendo del número de horas de utilización de la central.

#### **6.4 Determinación de costos de kWh instalado y kWh producido.**

Del análisis económico de gastos fijos y gastos variables efectuado podemos obtener una serie de conclusiones que nos permitan decidir cuál es la mejor alternativa de suministro de energía eléctrica desde el punto de vista económico.

Una vez conocidos los costos totales de la instalación, así como definidos los factores referentes a tasa de interés y amortización bancarios de las fuentes financieras, podemos mostrar los valores para la alternativa hidroeléctrica en el Cuadro 6.1 y graficar la ecuación Nro. 6.4 en función del número de horas de utilización anual (h) que se muestra en el Figura Nro. 6.1

Así mismo podemos efectuar una evaluación de la ecuación Nro. 6.5 donde podemos visualizar sus valores para las dos alternativas en la figura Nro. 124 para el grupo bomba turbina, turbina hidráulica y la variación del costo del kWh generado a lo largo de todo el año en función al número de horas de utilización anual para las dos alternativas analizadas, tal como se muestra en la Figura Nro. 125.

*Tabla 19. Costos Fijos y Costos de Instalación del grupo bomba turbina*

<b>COSTOS FIJOS Y COSTOS DE INSTALACIÓN GRUPO DE GENERACIÓN BOMBA TURBINA</b>					
H	I	p	C	g	ELSE
500	0.13	1250.59	162.58	0.325	0.166
1000	0.13	1250.59	162.58	0.163	0.166
1500	0.13	1250.59	162.58	0.108	0.166
2000	0.13	1250.59	162.58	0.081	0.166
2500	0.13	1250.59	162.58	0.065	0.166
3000	0.13	1250.59	162.58	0.054	0.166
3500	0.13	1250.59	162.58	0.046	0.166
4000	0.13	1250.59	162.58	0.041	0.166
4500	0.13	1250.59	162.58	0.036	0.166
5000	0.13	1250.59	162.58	0.033	0.166
5500	0.13	1250.59	162.58	0.03	0.166
6000	0.13	1250.59	162.58	0.027	0.166
6500	0.13	1250.59	162.58	0.025	0.166
7000	0.13	1250.59	162.58	0.023	0.166
7500	0.13	1250.59	162.58	0.022	0.166
8000	0.13	1250.59	162.58	0.02	0.166
8500	0.13	1250.59	162.58	0.019	0.166
8760	0.13	1250.59	162.58	0.019	0.166

Fuente: Propia

*Tabla 20. Costos Fijos y Costos de Instalación del grupo Michel Banki*

<b>COSTOS FIJOS Y COSTOS DE INSTALACIÓN GRUPO MICHELL BANKI</b>					
H	I	p	C	g	ELSE
500	0.14	1546.93	216.57	0.433	0.166
1000	0.14	1546.93	216.57	0.217	0.166
1500	0.14	1546.93	216.57	0.144	0.166
2000	0.14	1546.93	216.57	0.108	0.166
2500	0.14	1546.93	216.57	0.087	0.166
3000	0.14	1546.93	216.57	0.072	0.166
3500	0.14	1546.93	216.57	0.062	0.166
4000	0.14	1546.93	216.57	0.054	0.166
4500	0.14	1546.93	216.57	0.048	0.166
5000	0.14	1546.93	216.57	0.043	0.166
5500	0.14	1546.93	216.57	0.039	0.166
6000	0.14	1546.93	216.57	0.036	0.166
6500	0.14	1546.93	216.57	0.033	0.166
7000	0.14	1546.93	216.57	0.031	0.166
7500	0.14	1546.93	216.57	0.029	0.166
8000	0.14	1546.93	216.57	0.027	0.166
8500	0.14	1546.93	216.57	0.025	0.166
8760	0.14	1546.93	216.57	0.025	0.166

Fuente: Propia

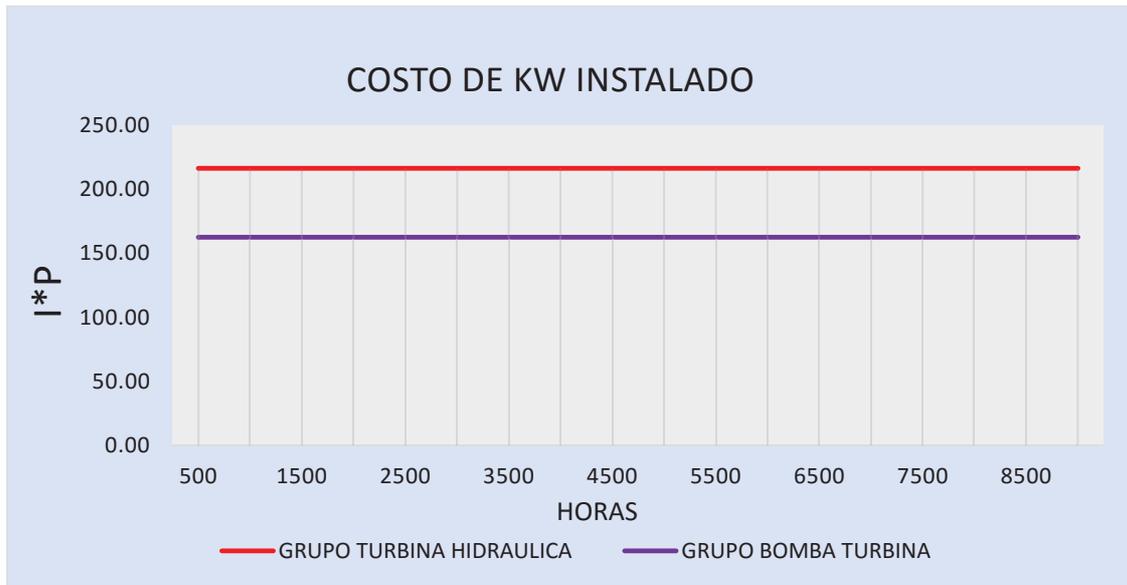


Figura 126. Costos de KW instalado.

Fuente: Propia

En la figura 124 se observa los costos de kW instalado de los grupos de generación de donde podemos indicar que los costos de instalación del grupo bomba turbina esta debajo de los costos del grupo turbina hidráulica, con esta evaluación podemos concluir que este tipo de grupo no convencional es una alternativa de selección para uso en micro centrales eléctricas aisladas.

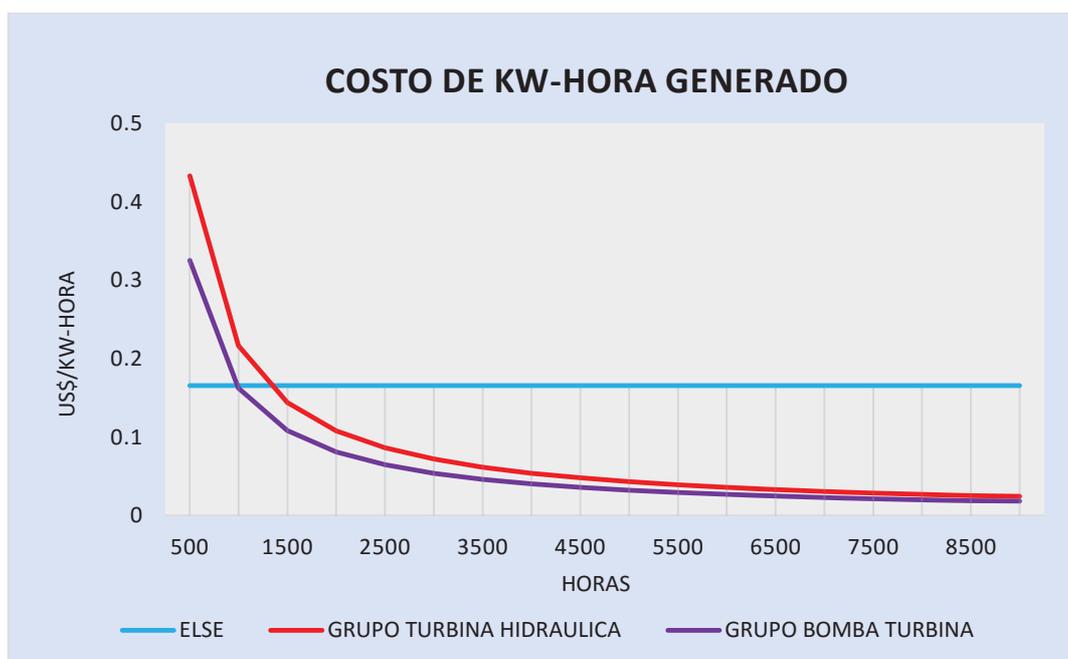


Figura 127. Costos de KW-h generado.

Fuente: Propia

De la evaluación se observa:

Los gráficos mostrados en las Fig. Nro. 124, y 125 nos permiten evaluar el comportamiento de los grupos de generación bomba turbina, turbina hidráulica. Debido a los bajos costos de instalación el grupo bomba turbina alcanza un costo de 1,250.59 US\$/kW instalado, mostrado un comportamiento horizontal por no haber gastos de combustibles.

Evaluando y analizando los costos de US\$/kW -h generado podemos observar:

A menor horas de generación (1500 horas), el costo US\$/kW -h generado de las tres alternativas la que está debajo de los precios comerciales es del grupo bomba turbina con 0.12 US\$/kW -h generado.

A horas de generación (2500 horas), el costo US\$/kW -h generado de las tres alternativas la que está debajo de los precios comerciales es del grupo bomba turbina con 0.08 US\$/kW -h generado.

A menor horas de generación (4500 horas), el costo US\$/kW -h generado de las tres alternativas la que está debajo de los precios comerciales es del grupo bomba turbina con 0.04 US\$/kW -h generado.

A medida que las horas de generación sean mayores, el costo US\$/kW -h generado para la concesionaria de electro sur este se mantiene constante, para el grupo turbina hidráulica baja, mientras para el grupo bomba turbina esta debajo de ambos costos comerciales.

con esto analizando y evaluando podemos indicar que tanto en costo de instalación, así como en costo de US\$/kW -hora de generación el grupo bomba turbina es una alternativa de mejor selección.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

En este proyecto de investigación experimental; se ha estudiado el comportamiento de motor de inducción jaula de ardilla operando como generador eléctrico auto excitado, por medio de un banco de capacitores conectados a través de los devanados de su estator al variar la velocidad, la carga y el caudal. Sobre la base de los resultados experimentales, y de las simulaciones realizadas; en los párrafos anteriores, se exponen algunas conclusiones y observaciones importantes del comportamiento del generador de inducción bajo estudio.

1. De las observaciones y cálculos realizados con el método Haque los parámetros eléctricos del motor WEG 7.5kW, los resultados obtenidos muestran una buena correspondencia entre los ensayos realizados en el banco de pruebas, demostrándose la validez y coherencia del método Haque, y según Martínez el cálculo del dimensionamiento del banco de capacitores para que la autoexcitación sea posibles es de  $104.4278\mu F$ .
2. De las pruebas experimentales el generador de inducción trifásica, se concluye que cuando el motor es compensado por un banco de capacitores de  $110\mu F$  por fase y accionado por una bomba centrífuga operando de forma inversa para operación como turbina, ha resultado dar una operación aceptable como generador eléctrico, además de demostrar que es una máquina de inducción que se acomoda a diferentes rangos de operaciones y con cargas variables.
3. De la operación como generador de inducción auto excitado se observó que a diferentes rangos de velocidad (RPM) con carga constante la potencia y la tensión van proporcionalmente a la velocidad, es decir cuando a mayor velocidad la tensión, corriente y la potencia se incrementan. Cuando la velocidad es menor la tensión, la potencia y la corriente tienden a disminuir para una carga constante. Y a diferentes rangos de velocidades (RPM) con carga variable se tiene el mismo comportamiento que con carga constante, entonces podemos decir que en ambas pruebas los comportamientos de la tensión, potencia y la corriente dependen de la carga y velocidad.
4. De las pruebas realizadas y datos obtenidos de la máquina de inducción auto excitado con carga resistiva (cocina eléctrica) se observa que las variables eléctricas están iguales o menores que los valores nominales, además están dentro

del rango que es aceptable. Por otro lado, se experimentó a mayor velocidad de la bomba madre a 65Hz a carga constante la tensión se incrementó a más de 250V con lo cual se activo es sistema de protección deteniendo la operación de la máquina. De lo mencionado se concluye que los parámetros eléctricos no sufren daños.

5. Los gráficos mostrados en las Fig. Nro. 126, y 127 nos permiten evaluar el comportamiento de los grupos de generación bomba turbina, turbina hidráulica. Debido a los bajos costos de instalación el grupo bomba turbina alcanza un costo de 1,250.59 US\$/kW instalado, mostrado un comportamiento horizontal por no haber gastos de combustibles. Evaluando y analizando los costos de US\$/kW -h generado podemos observar, A medida que las horas de generación van aumentado el costo US\$/kW -h generado de las tres alternativas, la que está debajo de los precios comerciales es del grupo bomba turbina, con esto queda demostrado que tanto en costo de instalación, así como en costo de US\$/kW-h de generación el grupo bomba turbina PAT es una alternativa de mejor selección.

## RECOMENDACIONES

Del presente trabajo de investigación experimental se recomienda las siguientes:

1. Para mejorar el caudal se recomienda aumentar su capacidad de la bomba madre, Para alcanzar la generación a valores nominales de igual forma en la selección de la bomba turbina se recomienda usar de mayor potencia con respecto a la potencia del MAG.
2. Para futuros trabajos se recomienda obtener más equipos de medición para tener mayor data, así como también instalación de equipos de medición tanto a la entrada como a la salida, esto ayudara a realizar un mayor análisis y evaluación de data.
3. Para realizar adecuadamente las diferentes pruebas de laboratorio que se derivan de la utilización del banco de pruebas, será necesario que el usuario este bien informado acerca de su operación, para realizar correctamente las pruebas de esta forma evitar daños en los equipos.
4. Para poder realizar un mayor número de pruebas al grupo de generación se recomienda implementar el laboratorio con más equipos, de esta manera poder regular la tensión y la frecuencia con mayor precisión para diferentes tipos de carga.
5. Para mejorar la data obtenida se recomienda acoplar nuestro MAG a una bomba turbina de mayor potencia, tanto como la bomba madre seleccionar de mayor potencia esto ayuda a llegar a velocidad cercana a la velocidad nominal del MAG.

## Bibliografía

- (s.f.).
- Alger, P., & K. Y. (1954). I.E.E. Speed-Torque Calculations for Induction Motors with Part-Winding. *Torque Calculations for Induction Motors with Part-Winding*.
- Álvarez Arroyo, J., Ortiz Marín, J., Zúñiga Ayala, J., Molina Silva, L., & Guerrero Ramírez, O. G. (2016). *Motor de Inducción Jaula de Ardilla como Generador*. Morelia: Academia Ingeniería Eléctrica, Instituto Tecnológico de Morelia.
- Chapallaz, J. M., Eichenberger, P., & Fischer, G. (1992). *Manual on Pumps Used as Turbines*. Germany: Vieweg.
- Chapman, S. J. (2012). *Maquinas Electricas*. New Yor: McGraw-Hill.
- comin, J. C. (2015). Analisis de la clase de rendimiento de los motores de induccion trifasica a partir de los datos del fabricante. Tarragona.
- Cortes Comin, J. (2015). Analisis de la Clase de Rendimiento de los Motores de Induccion Trifasico a partir de los Datos del Fabricante. *Tabajo de fin de Grado*. Tarragona.
- DAVIS MARTÍNEZ, A. H. (2017). MÉTODOS PARA DIMENSIONAR LA CAPACITANCIA DE UN GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTO-EXCITADO.
- Fitzgerald, K, Jr, Umans, & S.D. (2004). *Maquinas Electricas*. 6ta. Edicion. Editorial Mc Graw Hill.
- Guerero Cuesta, W. E. (2006). Estudio de la Variacion del Voltaje y la Frecuencia de Generacion de una Maquina de Induccion Funcionando como Generador. *Estudio de la Variacion del Voltaje y la Frecuencia de Generacion de una Maquina de Induccion Funcionando como Generador*. Quito.
- Harvey, A. (1998). Micro-Hydro Design Manual. London: IT publication.
- Hidrored. (2009). *Energías Renovables*. Peru: Soluciones Prácticas ITDG.
- HOFF MANN, C. (04 de JULIO de 2001). MANUAL DE MOTORES ELECTRICOS WEG. *MANUEL DE MOTORES ELECTRICOS WEG*. BRAZIL: WEG.
- Machuca Saldarriaga, F. V. (1990). *Maquinas Electricas Rotativas*. Peru: Megaprint Ediciones s.a.
- Martinez, A. H. (2017). Metodos para Dimenecionar la Capacitancia de un Generador de Induccion auto-exitado. *Metodos para Dimenecionar la Capacitancia de un Generador de Induccion auto-exitado*. Pereira.
- Nema Class B, S.-c. t. (2009). Desing of Induccion Motor. *Desing of Induccion Motor*.

- Nigel Smith. (1994). *Motors as Generators for Micro-Hydro Power*. Nottingham.
- Ortiz Campo, E., & Erazo Muñoz, H. T. (2011). Algoritmo para los procedimientos de regulacion de voltaje y frecuencia para una micro central hidroelectrica aislada con maquinas reversibles. Santiago de Cali.
- Ortiz Florez, R. (s.f.). Maquinas Reversibles Aplicadas a Mrico cetrales Hidroelectricas.
- Perez Solis , E. L. (2009). *Estudio de Generadores de Induccion en Sistemas de Generacion Electrica Renovables*. Huancayo.
- Pineda Sanchez, M. (s.f.). Caracterizacion y Calculo del Circuito Equivalente de un Motor de Induccion desde la placa de Caracteristicas. Valencia.
- Rodriguez Rojas, L. M., & Suarez Matarrita, L. (2013). Diseño de una central hidroelectrica para la Reserva Biologica Alverto Manuel Brenes. Costa Rica.
- Sanchez, T., & Escobar, R. (2012). Microcentrales hidroelectricas. Lima, Lima, Perú: Biblioteca Nacional del Perú N° 2012-11565.
- Say, M. (1970). Performance and Desing of AC Machine. *Performance and Desing of AC Machine*. London: 3ra Edition. Editorial Pitman.
- Veinott., C., & G. (1953). Machinery Design being Revolutionized by the Digital Computer. *Machinery Design being Revolutionized by the Digital Computer*. A.I.E.E.
- WEG, Motores. (2001). Manual de Motores Electricos WEG. *WEG Motores LTDA*. Obtenido de Especificacion de Motores Electricos.
- [www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf](http://www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf). (s.f.). Obtenido de [www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf](http://www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf).

## ANEXO

## Anexo 01: Matriz de Consistencia

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE 7.5 kW DE POTENCIA OPERANDO COMO GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE EL USO DE UN BANCO DE PRUEBAS				
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Metodología
¿De qué manera se puede estudiar del comportamiento de motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico mediante el uso de un banco de pruebas?	Estudiar del comportamiento de motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia operando como generador eléctrico mediante el uso de un banco de pruebas	El estudio del comportamiento de motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia permitirá operar como generador eléctrico mediante el uso de un banco de pruebas	<b>Variable Independiente:</b> Comportamiento de motor de inducción trifásico de 7.5 kW de potencia  <b>Indicadores:</b> Potencia generada. Potencia Activa. Potencia Reactiva.	<b>Tipo:</b> Cuantitativa y Aplicada.  <b>Nivel:</b> Explorativa - Descriptiva.  <b>Diseño:</b> Experimental
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		
¿En qué medida es posible desarrollar la modelación matemática de los parámetros eléctricos del motor inducción de 7.5 kW que será sometido a ensayos en un banco de pruebas?	Desarrollar la modelación matemática de los parámetros eléctricos del motor de inducción de 7.5 kW que será sometido a ensayos en un banco de pruebas.	El desarrollo de la modelación matemática de los parámetros eléctricos del motor de inducción de 7.5 kW permitirá someter a ensayos en un banco de pruebas.		
¿De qué manera se puede desarrollar la implementación de un sistema de control, automatización y adquisición de data, para almacenar datos de variables operativas centralizado en un PLC industrial y almacenado en un PC?	Desarrollar la implementar de un sistema de control, automatización y adquisición de data, para almacenar datos de variables operativas centralizado en un PLC industrial y almacenado en un PC.	El desarrollo de la implementación de un sistema de control, automatización y adquisición de data, permitirá almacenar datos de variables operativas centralizado en un PLC industrial y almacenado en un PC.	<b>Variable Dependiente:</b> Operando como generador eléctrico.  <b>Indicadores:</b> Parámetros eléctricos del motor. Eficiencia eléctrica del motor. Capacidad de banco de pruebas.	
¿Es posible efectuar pruebas de laboratorio de vacío, velocidad variable y contante, carga variable y carga constante y con carga RLC al motor de inducción trifásico para observar el comportamiento como generador, mediante el uso de un banco de pruebas?	Efectuar pruebas de laboratorio de vacío, velocidad variable y contante, carga variable y carga constante y con carga RLC al motor de inducción trifásico para observar el comportamiento como generador, mediante el uso de un banco de pruebas.	Si se efectúa pruebas de laboratorio de vacío, velocidad variable y contante, carga variable y carga constante y con carga RLC al motor de inducción trifásico permitirá observar el comportamiento como generador, mediante el uso de un banco de pruebas.		
¿Es posible analizar los costos de instalación (US\$/kW) y los costos de generación (US\$/kW-hora) de la producción de energía del MAG comparado con un generador síncrono convencional y su viabilidad económica?	Analizar los costos de instalación (US\$/kW) y los costos de generación (US\$/kW-hora) de la producción de energía del MAG comparado con un generador síncrono convencional y su viabilidad económica.	Si se analizar los costos de instalación (US\$/kW) y los costos de generación (US\$/kW-hora) de la producción de energía del MAG, permitirá comparar con un generador síncrono convencional y su viabilidad económica.	<b>Variable Interviniente:</b> Mediante el uso de un banco de pruebas.  <b>Indicador:</b> Banco de pruebas	

## Anexo 02: Código de programación en MATLAB.

Código de programación en MATLAB, del cálculo de los parámetros del motor de inducción y su comportamiento

```

clc
clear all
format long

%%
%Datos de la Placa
Pn=7.5; %Potencia kW
Vn=220; %Tensión de fase V
In=14.9; %Corriente A
Cosfi=0.84; %Factor de potencia
P=4; %número de polos
F=60; %Frecuencia nominal
N=1760; %Velocidad RPM

%%
%CARGA
%PL=Pn; % Potencia activa de la carga en kW
%Fi=0.86; % Factor de potencia de la carga
%SL= PL/Fi; % Potencia nominal kVAR
%QL=SL*sind(acosd(Fi)); %Potencia Reactiva de Carga kVA

%RL=Vn^2/(PL*1000); % Resistencia de carga en ohm
%XL=Vn^2/(QL*1000); % Reactancia de carga en ohm

RL=20;
XL=13;

%%
% ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR DE JAULA DE ARDILLA MEDIANTE
LA
% TÉCNICA DE JAQUE que fue desarrollado por M.H. Haque:
% Esta técnica usa a partir de los datos de la placa de la maquina

Ns=120*F/P; %Velocidad síncrona
Sn=(Ns-N)/Ns; %Deslizamiento

Rr=Pn*1000*Sn/(3*In^2); %Resistencia del Rotor

AlphaR=2.5; %Menor errores
Rs=AlphaR*Rr; %Resistencia del estator

Xs=0.05*Vn/(sqrt(3)*In); %inductancia el estator
Xr=Xs; %Inductancia en el rotor

Xm=Vn/(0.2*In); %Inductancia de magnetización

%%
%LLEVANDO A P.U.
%Valores base
Pbase=7500; %Potencia base total
Pb=Pbase/3; %Potencia por fase
Vb=220; % Tension base por fase

```

```

Ib=Pb/Vb; % Corriente base
Zb=Vb/Ib; % Impedancia base
Fb=60; %Frecuencia base
Nb=1800;

Rr1=Rr/Zb; % Resistencia del rotor en p.u.
Rs1=Rs/Zb; % Resistencia del estator en p.u.
Xs1=Xs/Zb; % Impedancia del Estator en p.u.
Xr1=Xs1; % Impedancia del Rotor en p.u.
Xm1=Xm/Zb; % Impedancia de Magnetización en p.u.
Fu=F/Fb; %Frecuencia en p.u.
Nu=N/Nb; %Velocidad en p.u.

RL1=RL/Zb; %Resistencia de carga por fase en p.u.
XL1=XL/Zb; %Reactancia de carga por fase en p.u.

%%
%REQUERIMIENTO DE CAPACITANCIA PARA GENERADORES DE INDUCCIÓN
%AUTO-EXCITADOS AISLADOS
% Se usa el método:
%Desarrollado por A.K Al Jabri, Msc,MA,PhD, A.I.Alolah,BSc,PhD

T=Xs1+Xm1;
W=Xs1+Xs1*Xm1/(Xs1+Xm1);
A1=RL1*T*W+XL1*T*(Rs1+Rr1);
A2=Nu*T*(RL1*W+Rs1*XL1);
A3=Rr1*(XL1+T)+T*(Rs1+RL1);
A4=RL1*Rs1*Rr1;
A5=Nu*T*(RL1+Rs1);
B1=XL1*T*W;
B2=Nu*B1;
B3=T*(XL1+W);
B4=RL1*T*(Rs1+Rr1)+Rs1*Rr1*XL1;
B5=Nu*B3;
B6=Nu*RL1*Rs1*T;
B7=Rr1*(RL1+Rs1);

%Cálculo de coeficientes de polinomio AL4*F^4-AL3*F^3+AL2*F^2-
AL1*F+AL0
AL4=A1*B3-A3*B1;
AL3=A2*B3+A1*B5-A3*B2-A5*B1;
AL2=A2*B5+A3*B4-A4*B3-A1*B7-A5*B2;
AL1=A3*B6+A5*B4-A4*B5-A2*B7;
AL0=A5*B6+A4*B7;

if AL4>0&AL3>0&AL2>0&AL1>0&AL0>=0
% AL4*F^4-AL3*F^3+AL2*F^2-AL1*F+AL0
POL=[AL4 -AL3 AL2 -AL1 AL0];
Fi=roots(POL);
else
disp('Raíz de polinomios negativas')
end

F11=Fi(1,1);
F21=Fi(2,1);
F31=Fi(3,1);
F41=Fi(4,1);

```

```

%
F11R=isreal(F11);
F21R=isreal(F21);
F31R=isreal(F31);
F41R=isreal(F41);

if F11R==1
    F1=F11;
    Xc1=(A1*F1^3-A2*F1^2-A4*F1)/(A3*F1-A5);% Reactancia de
    capacitancia en p.u.
    C1=1/(2*pi*60*Zb*Xc1)*10^6; % Capacitancia en uF
else
    disp('F1 Raíz de frecuencia no real')
end

if F21R==1
    F2=F21;
    Xc2=(A1*F2^3-A2*F2^2-A4*F2)/(A3*F2-A5);% Reactancia de
    capacitancia en p.u.
    C2=1/(2*pi*60*Zb*Xc2)*10^6; % Capacitancia en uF
else
    disp('F2 Raíz de frecuencia no real');
end

if F31R==1
    F3=F31;
    Xc3=(A1*F3^3-A2*F3^2-A4*F3)/(A3*F3-A5);% Reactancia de
    capacitancia en p.u.
    C3=1/(2*pi*60*Zb*Xc3)*10^6; % Capacitancia en uF
else
    disp('F3 Raíz de frecuencia no real')
end

if F41R==1
    F4=F41;
    Xc4=(A1*F4^3-A2*F4^2-A4*F4)/(A3*F4-A5);% Reactancia de
    capacitancia en p.u.
    C4=1/(2*pi*60*Zb*Xc4)*10^6; % Capacitancia en uF

else
    disp('F4 Raíz de frecuencia no real')
end

%%
% GRAFICO TORQUE-VELOCIDAD COMO MOTOR

s1=0:0.001:1; %Valores del deslizamiento
nr1 = N.*(1-s1); %velocidad del rotor

%Funcion
Iml = Vn./sqrt((Rs + Rr./s1).^2 + (Xs+Xr)^2); % Corriente del motor A
Pcgl = Iml.^2.*(Rr./s1); % Potencia de campo giratorio N.m
Tel = 3*9.55.*Pcgl./N; %par desarrollado

```

```

%gráfico torque _ Velocidad
figure(1)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('n_{rev/min}');
ylabel('Te_{N.m}');
title('MOTOR: Torque vs Velocidad');
plot(nr1,Te1,'r','LineWidth',2); % Grafica torque vs velocidad

% Gráfico Magnetización-Torque
figure(2)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('n_{RPM}');
ylabel('Im_{A}');
title('MOTOR: Corriente de magnetización vs Torque')
plot(nr1,Im1,'b--','LineWidth',2);

%%
% GRAFICO TORQUE-VELOCIDAD COMO GENERADOR (sin carga)

s2=-1:0.001:0; %Valores del deslizamiento
nr2 = N.*(1-s2); %velocidad del rotor

%Funcion
Im2 = Vn./sqrt((Rs + Rr./s2).^2 + (Xs+Xr)^2); % Corriente del motor A
Pcg2 = Im2.^2.*(Rr./s2); % Potencia de campo giratorio N.m
Te2 = 3*9.55.*Pcg2./N; %par desarrollado

%gráfico torque _ Velocidad
figure(3)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('n_{rev/min}');
ylabel('Te_{N.m}');
title('GENERADOR: Torque vs Velocidad');
plot(nr2,Te2,'r','LineWidth',2); % Grafica torque vs velocidad

% Gráfico Magnetización-Torque
figure(4)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('n_{RPM}');
ylabel('Im_{A}');
title('GENERADOR: Corriente de magnetización vs Torque')
plot(nr2,Im2,'b--','LineWidth',2);

%%
% GRAFICO TORQUE-VELOCIDAD COMO GENERADOR (Con Carga)

s3=-1:0.001:0; %Valores del deslizamiento
a=Fu; %a: Frecuencia en p.u.
b=Nu; % Velocidad en p.u.

```

```

nr3 = N.*(1-s3); %velocidad del rotor

% Ecuaciones Previas
IL=Vn./(sqrt(RL1.^2+XL1.^2));
IC=Vn./Xc3;
Z1=Xm.*(Xr1.^2+(Rr1./s3).^2).^1/2./(Xm1+(Xr1.^2+(Rr1./s3).^2).^1/2);
Zth=sqrt(Rs1.^2+Xs1.^2)+Z1;
I1=Vn./Zth;
E1=I1.*Xm1;

%Funcion
Im3 = E1./(Xm1); % Corriente del motor A
Pcg3 = Im3.^2.*(Rr1./s3); % Potencia de campo giratorio N.m
Te3 = 3*9.55.*Pcg3./N; %par desarrollado

%gráfico torque _ Velocidad
figure(5)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('n_{rev/min}');
ylabel('Te_{N.m}');
title('GENERADOR con carga: Torque vs Velocidad');
plot(nr3,Te3,'r','LineWidth',2); % Grafica torque vs velocidad

% Gráfico Magnetización-Torque
figure(6)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('n_{RPM}');
ylabel('Im_{A}');
title('GENERADOR con carga: Corriente de magnetización vs Torque');
plot(nr3,Im3,'b--','LineWidth',2);

% Gráfico CAPACITOR

Vx=0:220;
ic=Vx/Xc3;
Im2 = Vn./sqrt((Rs + Rr./s2).^2 + (Xs+Xr)^2); % Corrientes del motor A
Vx1=Im2*Xm;
figure(7)
grid on;
grid minor;
hold on;
xlabel('Ic_{A}');
ylabel('VL_{V}');
title('---')
%hold on
plot(ic,Vx);
%plot(ic,Vx,'r--*','LineWidth',2);
%plot(im,Vx,'r--*','LineWidth',2);
%plot(ic,Vx,Im2,Vx1);
%plot(Im2,E1/1000);

```

### Anexo 03: Recopilación de datos experimentales de las pruebas

*Tabla 21. Datos experimentales del MAG a velocidad mínima*

<i>Récord</i>	<i>V11</i>	<i>V12</i>	<i>V13</i>	<i>I11</i>	<i>I12</i>	<i>I13</i>	<i>P1</i>	<i>P1+</i>	<i>Q1</i>	<i>Q1+</i>	<i>S1</i>	<i>F1</i>	<i>FP1</i>	<i>RPM1</i>
1	66.24	66.43	66.01	3.34	3.72	3.91	-121.17	121.17	-58.8	58.8	419.7	45.65	0.29	1373
2	65.83	66	65.57	3.3	3.68	3.87	-118.94	118.94	-57.39	57.39	413.16	48.26	0.29	1370
3	65.59	65.8	65.35	3.3	3.67	3.86	-119.09	119.09	-58.14	58.14	410.48	45.78	0.29	1369
4	66.38	66.58	66.15	3.35	3.73	3.93	-121.55	121.55	-58.39	58.39	420.23	45.92	0.29	1374
5	67.32	67.51	67.08	3.41	3.8	4	-125.05	125.05	-59.2	59.2	434	45.93	0.29	1378
6	68.43	68.68	68.2	3.47	3.85	4.06	-129.34	129.34	-62.25	62.25	448.78	45.8	0.29	1376
7	68.63	68.93	68.41	3.47	3.86	4.06	-131.21	131.21	-62.65	62.65	451.87	45.73	0.29	1374
8	68.51	68.79	68.3	3.46	3.85	4.05	-129.39	129.39	-61.68	61.68	449.75	45.72	0.29	1373
9	68.35	68.55	68.13	3.45	3.83	4.04	-129.12	129.12	-60.98	60.98	447.05	45.68	0.29	1373
10	67.97	68.16	67.7	3.43	3.81	4.01	-128.13	128.13	-60.14	60.14	441.89	45.72	0.29	1370
11	67.51	67.73	67.28	3.4	3.78	3.98	-125.69	125.69	-59.87	59.87	435.53	47.13	0.29	1370
12	67.09	67.35	66.88	3.38	3.76	3.96	-124.43	124.43	-59.24	59.24	430.37	45.81	0.29	1370
13	67.38	67.66	67.15	3.41	3.79	3.99	-125.66	125.66	-60.1	60.1	434.74	45.84	0.29	1375
14	67.79	68.07	67.55	3.43	3.81	4.01	-126.3	126.3	-61.07	61.07	440.36	46.01	0.28	1374
15	67.69	67.96	67.48	3.41	3.8	4	-127.04	127.04	-61.75	61.75	438.47	47.18	0.29	1372
16	67.42	67.62	67.18	3.4	3.78	3.98	-125.11	125.11	-60.79	60.79	434.52	45.68	0.29	1372
17	67.28	67.48	67.01	3.39	3.77	3.97	-125.04	125.04	-59.89	59.89	432.46	45.72	0.29	1372
18	67.62	67.81	67.32	3.42	3.8	4	-127.12	127.12	-60.49	60.49	437.14	45.86	0.29	1374
19	68.54	68.72	68.26	3.47	3.86	4.06	-130.6	130.6	-61.33	61.33	449.29	45.85	0.29	1378
20	69.19	69.4	68.9	3.51	3.9	4.1	-131.88	131.88	-63.53	63.53	458.85	45.85	0.29	1377

21	69.71	69.88	69.36	3.53	3.92	4.13	-134.04	134.04	-64.04	64.04	465.43	45.8	0.29	1379
22	70.61	70.87	70.31	3.58	3.98	4.19	-138.62	138.62	-66.3	66.3	478.68	45.84	0.29	1377
23	70.92	71.2	70.65	3.59	3.99	4.2	-139.78	139.78	-67.2	67.2	482.71	45.72	0.29	1375
24	70.4	70.66	70.1	3.56	3.95	4.16	-137.06	137.06	-64.88	64.88	475.03	45.69	0.29	1372
25	69.89	70.17	69.61	3.53	3.93	4.13	-135.53	135.53	-63.23	63.23	468.13	45.7	0.29	1370
26	68.97	69.26	68.77	3.48	3.87	4.07	-131.87	131.87	-62.86	62.86	455.86	45.6	0.29	1370
27	68.14	68.37	67.93	3.43	3.82	4.02	-128.15	128.15	-61.01	61.01	444.06	45.72	0.29	1369
28	68.03	68.23	67.78	3.44	3.82	4.02	-127.52	127.52	-60.8	60.8	442.69	45.81	0.29	1371
29	68.45	68.7	68.18	3.46	3.85	4.05	-129.96	129.96	-62.3	62.3	448.8	45.88	0.29	1376
30	69.65	69.87	69.33	3.53	3.92	4.13	-135.2	135.2	-64.21	64.21	465.25	45.89	0.29	1378
31	70.01	70.21	69.72	3.54	3.94	4.15	-136.15	136.15	-65.07	65.07	469.93	45.72	0.29	1376
32	69.75	69.95	69.43	3.52	3.91	4.12	-134.97	134.97	-64.15	64.15	464.76	45.68	0.29	1373
33	69.07	69.36	68.83	3.49	3.87	4.08	-131.58	131.58	-62.81	62.81	456.88	45.61	0.29	1370
34	68.45	68.73	68.24	3.46	3.84	4.04	-129.36	129.36	-61.37	61.37	448.53	45.75	0.29	1370
35	68.59	68.84	68.33	3.47	3.86	4.06	-129.89	129.89	-61.74	61.74	450.8	45.78	0.29	1374
36	68.72	68.93	68.45	3.47	3.86	4.06	-130.91	130.91	-62.4	62.4	452.28	45.66	0.29	1375
37	68.34	68.49	68.06	3.44	3.82	4.03	-128.74	128.74	-61.32	61.32	444.88	45.6	0.29	1371
38	67.18	67.36	66.9	3.38	3.76	3.96	-125.04	125.04	-58.59	58.59	430.68	45.66	0.29	1369
39	66.91	67.13	66.65	3.37	3.75	3.95	-123.19	123.19	-58.58	58.58	427.76	45.74	0.29	1372
40	67.13	67.39	66.92	3.39	3.77	3.97	-125.04	125.04	-60.14	60.14	431.47	45.81	0.29	1373
41	67.45	67.68	67.23	3.41	3.79	3.99	-125.04	125.04	-59.8	59.8	435.18	45.82	0.29	1376
42	68.24	68.49	68	3.45	3.84	4.04	-129.11	129.11	-62.38	62.38	446.01	47.32	0.29	1375
43	68.86	69.15	68.6	3.49	3.88	4.09	-131.29	131.29	-63.26	63.26	453.94	45.88	0.29	1377

44	69.71	70.02	69.47	3.54	3.93	4.14	-134.65	134.65	-64.12	64.12	465.81	45.86	0.29	1377
45	69.93	70.26	69.72	3.54	3.94	4.14	-136.21	136.21	-64.77	64.77	470.14	45.71	0.29	1376
46	69.81	70.07	69.57	3.53	3.92	4.13	-134.92	134.92	-64.45	64.45	466.97	45.73	0.29	1372
47	69.61	69.89	69.38	3.52	3.91	4.12	-134.25	134.25	-63.57	63.57	464.21	45.65	0.29	1372
48	68.97	69.2	68.7	3.48	3.86	4.07	-131.79	131.79	-62.25	62.25	455.9	45.62	0.29	1370
49	68.38	68.64	68.1	3.45	3.83	4.03	-129.97	129.97	-61.42	61.42	447.82	45.66	0.29	1370
50	67.73	68	67.5	3.4	3.79	3.99	-126.34	126.34	-60.47	60.47	437.3	47.11	0.29	1370
51	67.01	67.21	66.78	3.37	3.76	3.95	-123.81	123.81	-59.25	59.25	428.93	45.71	0.29	1370
52	66.93	67.09	66.68	3.37	3.75	3.95	-123.61	123.61	-58.24	58.24	427.73	45.75	0.29	1373
53	67.08	67.26	66.83	3.38	3.77	3.96	-124.36	124.36	-58.59	58.59	429.85	45.79	0.29	1373
54	67.14	67.32	66.89	3.38	3.77	3.96	-125.04	125.04	-59.84	59.84	431.36	46.43	0.29	1374
55	66.88	67.07	66.62	3.37	3.75	3.95	-123.26	123.26	-60.17	60.17	427.22	45.76	0.29	1372
56	67.27	67.52	66.98	3.4	3.78	3.98	-124.91	124.91	-59.79	59.79	432.14	45.84	0.29	1375
57	67.75	68.02	67.45	3.42	3.81	4.01	-126.91	126.91	-59.78	59.78	439.14	45.77	0.29	1376
58	67.93	68.19	67.67	3.43	3.82	4.02	-127.28	127.28	-60.07	60.07	441.75	45.78	0.29	1373
59	68.16	68.36	67.9	3.44	3.83	4.03	-128.72	128.72	-61.12	61.12	444.12	47.22	0.29	1374
60	67.68	67.92	67.48	3.41	3.79	3.99	-126.26	126.26	-61.02	61.02	438.81	45.64	0.29	1371
61	67.31	67.52	67.13	3.39	3.77	3.97	-125.04	125.04	-60.14	60.14	433.08	45.7	0.29	1371
62	66.91	67.08	66.65	3.36	3.74	3.94	-123.6	123.6	-59.18	59.18	428.31	45.56	0.29	1372
63	65.77	65.96	65.55	3.29	3.66	3.85	-118.96	118.96	-58.65	58.65	412.58	50.62	0.29	1366
64	64.27	64.44	64.11	3.21	3.58	3.77	-113.4	113.4	-57.67	57.67	393.31	48.22	0.29	1365
65	64.08	64.24	63.87	3.21	3.58	3.76	-112.31	112.31	-58.1	58.1	390.38	49.66	0.29	1370
66	64.36	64.52	64.12	3.25	3.62	3.8	-113.99	113.99	-57.97	57.97	393.83	45.9	0.29	1374

67	65.81	65.95	65.54	3.34	3.71	3.9	-119.56	119.56	-57.14	57.14	412.52	45.98	0.29	1379
68	66.8	66.95	66.51	3.38	3.76	3.95	-123.07	123.07	-58.51	58.51	426.55	45.79	0.29	1379
69	66.77	66.94	66.48	3.37	3.75	3.94	-123.6	123.6	-57.92	57.92	426.45	45.69	0.29	1374
70	66.74	66.92	66.44	3.35	3.74	3.93	-122.08	122.08	-58.32	58.32	424.35	49.19	0.29	1372
71	66.73	66.88	66.46	3.36	3.75	3.94	-122.77	122.77	-59.31	59.31	424.92	45.76	0.29	1374
72	66.84	67.06	66.62	3.37	3.75	3.95	-122.59	122.59	-58.06	58.06	427.04	45.74	0.28	1373
73	67.07	67.32	66.87	3.39	3.77	3.97	-124.43	124.43	-58.91	58.91	429.68	45.8	0.29	1374
74	67.6	67.86	67.42	3.42	3.8	4	-126	126	-59.7	59.7	437.62	45.77	0.29	1376
75	67.99	68.21	67.77	3.44	3.82	4.02	-128.77	128.77	-60.44	60.44	442.42	45.82	0.29	1374
76	68.16	68.4	67.95	3.44	3.83	4.03	-129.36	129.36	-61.42	61.42	445.05	45.75	0.29	1374
77	68.22	68.44	67.96	3.44	3.83	4.03	-128.73	128.73	-61.68	61.68	445.7	45.75	0.29	1374
78	67.53	67.73	67.27	3.4	3.78	3.98	-126.32	126.32	-60.49	60.49	436.8	47.1	0.29	1370
79	66.92	67.13	66.67	3.37	3.75	3.95	-123.19	123.19	-58.96	58.96	427.98	45.72	0.29	1371
80	66.87	67.14	66.66	3.37	3.75	3.95	-123.61	123.61	-58.57	58.57	427.87	45.72	0.29	1374
81	67.14	67.4	66.93	3.39	3.77	3.97	-124.35	124.35	-60.37	60.37	431.65	47.34	0.29	1374
82	67.99	68.25	67.76	3.44	3.83	4.03	-127.59	127.59	-61.98	61.98	442.63	45.87	0.29	1377
83	68.39	68.6	68.1	3.46	3.84	4.05	-129.54	129.54	-61.77	61.77	448.15	45.7	0.29	1377
84	68.24	68.45	67.98	3.44	3.83	4.03	-129.34	129.34	-60.42	60.42	445.54	45.76	0.29	1374
85	68	68.18	67.75	3.43	3.81	4.01	-127.87	127.87	-60.25	60.25	442.74	45.65	0.29	1372
86	67.62	67.75	67.32	3.41	3.79	3.99	-126.9	126.9	-59.21	59.21	436.26	45.77	0.29	1371
87	67.89	68.11	67.61	3.43	3.81	4.01	-126.91	126.91	-60.39	60.39	440.25	45.79	0.29	1373
88	68.3	68.52	68.03	3.45	3.84	4.04	-129.36	129.36	-61.37	61.37	446.76	45.78	0.29	1376
89	68.52	68.75	68.25	3.46	3.85	4.05	-129.95	129.95	-61.69	61.69	449.75	45.78	0.29	1375

90	68.34	68.6	68.08	3.45	3.84	4.04	-129.33	129.33	-61.03	61.03	447.22	45.65	0.29	1373
91	67.65	67.87	67.41	3.4	3.79	3.99	-126.89	126.89	-60.71	60.71	438.29	45.62	0.29	1372
92	66.98	67.14	66.75	3.37	3.75	3.94	-123.29	123.29	-59.87	59.87	427.89	46.76	0.29	1370
93	66.87	67.01	66.61	3.37	3.75	3.95	-123.68	123.68	-59.17	59.17	426.89	45.84	0.29	1374
94	67.63	67.82	67.39	3.42	3.81	4	-126.28	126.28	-59.49	59.49	438.06	45.79	0.29	1377
95	67.63	67.89	67.43	3.41	3.8	4	-126.5	126.5	-61.2	61.2	438.28	45.69	0.29	1375
96	67.26	67.5	67.02	3.39	3.77	3.97	-125.71	125.71	-59.28	59.28	432.59	45.7	0.29	1371
97	67.37	67.59	67.09	3.4	3.79	3.98	-125.44	125.44	-58.25	58.25	434.25	45.83	0.29	1374
98	67.65	67.93	67.38	3.41	3.8	4	-126.22	126.22	-58.56	58.56	438.26	45.76	0.29	1373
99	67.75	68.03	67.54	3.42	3.81	4.01	-126.91	126.91	-59.83	59.83	439.59	45.77	0.29	1374
100	68.32	68.58	68.09	3.46	3.84	4.05	-129.43	129.43	-61.33	61.33	447.31	45.88	0.29	1374

*Nota: tomando de la biblioteca de información. Fuente: propia.*

## Anexo 04: Vistas de parámetros de interfaz de usuario

En Vacío

Banco De Pruebas Para Turbomáquinas Hidráulicas		
<b>DATOS ELECTRICOS ELECTROBOMBA</b>		
Tension:	223.97 V	
Corriente:	31.09 A	
Potencia Activa:	13310.34 Watt	
Potencia Reactiva:	16099.06 VAR	
Potencia Aparente:	20688.67 VA	
Frecuencia:	60.04 Hz	
RPM:	0 rpm	
<b>PRESION ELECTROBOMBA</b>		
Presion:	2.42 Bar	
<b>CAUDAL EN TUBERIA</b>		
Caudal:	1081.89 L/min	
<b>ALTURA EN TUBERIA</b>		
Altura:	24.2 m	
<b>DATOS ELECTRICOS THC</b>		
Tensión UL1-L2:	0 V	
Tensión UL2-L3:	0 V	
Tensión UL3-L1:	0 V	
Corriente L1:	0 A	
Corriente L2:	0 A	
Corriente L3:	0 A	
Potencia Activa:	0 Watt	
Potencia Reactiva:	0 VAR	
Potencia Aparente:	0 VA	
Frecuencia:	0 Hz	
<b>PRESION THC</b>		
Presion:	0.06 Bar	
<b>RPM THC</b>		
RPM:	0 rpm	
<b>DATOS ELECTRICOS BFT</b>		
Tensión UL1-L2:	0 V	
Tensión UL2-L3:	0 V	
Tensión UL3-L1:	0 V	
Corriente L1:	0 A	
Corriente L2:	0 A	
Corriente L3:	0 A	
Potencia Activa:	0 Watt	
Potencia Reactiva:	0 VAR	
Potencia Aparente:	0 VA	
Frecuencia:	0 Hz	
<b>PRESION BFT</b>		
Presion:	2.09 Bar	
<b>RPM BFT</b>		
RPM:	2891 rpm	

Solo condensadores

Banco De Pruebas Para Turbomáquinas Hidráulicas		
<b>DATOS ELECTRICOS ELECTROBOMBA</b>		
Tension:	227.68 V	
Corriente:	13.71 A	
Potencia Activa:	5731.68 Watt	
Potencia Reactiva:	7404.03 VAR	
Potencia Aparente:	9363.32 VA	
Frecuencia:	60.02 Hz	
RPM:	0 rpm	
<b>PRESION ELECTROBOMBA</b>		
Presion:	1.14 Bar	
<b>CAUDAL EN TUBERIA</b>		
Caudal:	909.72 L/min	
<b>ALTURA EN TUBERIA</b>		
Altura:	11.3 m	
<b>DATOS ELECTRICOS THC</b>		
Tensión UL1-L2:	0 V	
Tensión UL2-L3:	0 V	
Tensión UL3-L1:	0 V	
Corriente L1:	0 A	
Corriente L2:	0 A	
Corriente L3:	0 A	
Potencia Activa:	0 Watt	
Potencia Reactiva:	0 VAR	
Potencia Aparente:	0 VA	
Frecuencia:	0 Hz	
<b>PRESION THC</b>		
Presion:	0.06 Bar	
<b>RPM THC</b>		
RPM:	0 rpm	
<b>DATOS ELECTRICOS BFT</b>		
Tensión UL1-L2:	222.06 V	
Tensión UL2-L3:	223.32 V	
Tensión UL3-L1:	222.76 V	
Corriente L1:	0 A	
Corriente L2:	0 A	
Corriente L3:	0 A	
Potencia Activa:	0 Watt	
Potencia Reactiva:	0 VAR	
Potencia Aparente:	0 VA	
Frecuencia:	54.43 Hz	
<b>PRESION BFT</b>		
Presion:	0.87 Bar	
<b>RPM BFT</b>		
RPM:	1855 rpm	

Con carga balanceada

### Banco De Pruebas Para Turbomáquinas Hidráulicas

DATOS ELECTRICOS ELECTROBOMBA		DATOS ELECTRICOS THC		DATOS ELECTRICOS BFT	
Tension:	226.23 V	Tensión UL1-L2:	0 V	Tensión UL1-L2:	221.44 V
Corriente:	19.42 A	Tensión UL2-L3:	0 V	Tensión UL2-L3:	224.12 V
Potencia Activa:	8134.27 Watt	Tensión UL3-L1:	0 V	Tensión UL3-L1:	224.43 V
Potencia Reactiva:	10372.25 VAR	Corriente L1:	0 A	Corriente L1:	0.76 A
Potencia Aparente:	13101.43 VA	Corriente L2:	0 A	Corriente L2:	0.49 A
Frecuencia:	60.01 Hz	Corriente L3:	0 A	Corriente L3:	2.17 A
RPM:	0 rpm	Potencia Activa:	0 Watt	Potencia Activa:	-349.21 Watt
PRESION ELECTROBOMBA		Potencia Reactiva:	0 VAR	Potencia Reactiva:	231.82 VAR
Presion:	1.3 Bar	Potencia Aparente:	0 VA	Potencia Aparente:	445.14 VA
CAUDAL EN TUBERIA		Frecuencia:	0 Hz	Frecuencia:	54.76 Hz
Caudal:	1080.44 L/min	PRESION THC		PRESION BFT	
ALTURA EN TUBERIA		Presion:	0.06 Bar	Presion:	0.97 Bar
Altura:	12.9 m	RPM THC		RPM BFT	
		RPM:	0 rpm	RPM:	1868 rpm

Con sobrecarga

### Banco De Pruebas Para Turbomáquinas Hidráulicas

DATOS ELECTRICOS ELECTROBOMBA		DATOS ELECTRICOS THC		DATOS ELECTRICOS BFT	
Tension:	224.26 V	Tensión UL1-L2:	0 V	Tensión UL1-L2:	203.49 V
Corriente:	20.2 A	Tensión UL2-L3:	0 V	Tensión UL2-L3:	200.67 V
Potencia Activa:	12048.28 Watt	Tensión UL3-L1:	0 V	Tensión UL3-L1:	199.09 V
Potencia Reactiva:	14660.6 VAR	Corriente L1:	0 A	Corriente L1:	1.74 A
Potencia Aparente:	16976.15 VA	Corriente L2:	0 A	Corriente L2:	1.99 A
Frecuencia:	59.94 Hz	Corriente L3:	0 A	Corriente L3:	0.91 A
RPM:	0 rpm	Potencia Activa:	0 Watt	Potencia Activa:	-409.41 Watt
PRESION ELECTROBOMBA		Potencia Reactiva:	0 VAR	Potencia Reactiva:	256.27 VAR
Presion:	1.28 Bar	Potencia Aparente:	0 VA	Potencia Aparente:	540.98 VA
CAUDAL EN TUBERIA		Frecuencia:	0 Hz	Frecuencia:	52.73 Hz
Caudal:	3993.2 L/min	PRESION THC		PRESION BFT	
ALTURA EN TUBERIA		Presion:	0.06 Bar	Presion:	0.96 Bar
Altura:	13 m	RPM THC		RPM BFT	
		RPM:	0 rpm	RPM:	1800 rpm