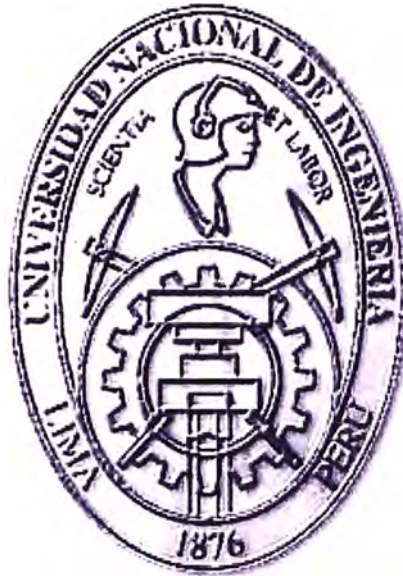


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



PLANTAS MINIHIDROELÉCTRICAS USANDO BOMBAS Y MOTORES DE INDUCCIÓN CONTROLADOS ELECTRÓNICAMENTE

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTADO POR:

MANUEL ANTONIO HUAMÁN HERNÁNDEZ

PROMOCIÓN

2008- I

LIMA -PERÚ

2012

**PLANTAS MINIHIDROELÉCTRICAS USANDO BOMBAS Y
MOTORES DE INDUCCIÓN CONTROLADOS
ELECTRONICAMENTE**

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, a mi madre Margarita, a mi familia, a Sadie, y a mis verdaderos amigos que me ayudaron y alentaron en iniciar y culminar este importante trabajo.

También quiero agradecer al Dr. Moreno, por su gran aporte, paciencia, y comprensión durante todo este tiempo en el desarrollo del presente informe.

Finalmente mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería y profesores que con sus enseñanzas forman nuevos y grandes profesionales.

SUMARIO

El presente informe consiste en el análisis de la viabilidad técnica de utilizar un sistema sencillo y efectivo de control electrónico para regular la tensión y fijar la frecuencia de un motor de inducción trifásico operado a la inversa como generador autoexcitado impulsado por una bomba hidráulica operada a la inversa como turbina de eje no regulado, y con ello implementar una fuente de energía eléctrica de buena calidad bajo las tolerancias especificadas la norma peruana NTCSE, y de bajo costo al disminuir la complejidad en la implementación de los equipos propios de una minicentral hidroeléctrica aislada del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

Utilizando el método de control con carga DC y de un inversor trifásico PWM tipo fuente de tensión, los resultados de las simulaciones mediante software demostraron que el sistema de control propuesto brinda una buena regulación de tensión y frecuencia ante el incremento gradual y desconexión de cargas resistivas; representando así una oportunidad sencilla, económica y eficiente para incentivar la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de los recursos hidráulicos de bajo caudal en nuestro país.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
ANTECEDENTES	
1.1 Antecedentes de la generación hidráulica	3
1.2 Generación hidráulica rural	4
1.3 El papel de la máquina de inducción	5
1.4 Electrificación Rural con Energía Minihidroeléctrica en el Perú	6
1.5 Antecedentes del sistema de minigeneración hidráulica en estudio	7
CAPÍTULO II	
FUNDAMENTO TEÓRICO	
2.1 Plantas minihidroeléctricas	9
2.1.1 Clasificación de las plantas minihidroeléctricas	10
2.2 Bombas centrífugas como turbinas hidráulicas	10
2.3 Motores como generadores de inducción	11
2.4 Generadores de inducción	12
2.4.1 Curva de magnetización y autoexcitación	13
2.5 La máquina de inducción	15
2.5.1 Construcción	16
2.5.2 Principio de funcionamiento y deslizamiento	17
2.5.3 Modelamiento en estado estacionario	18
2.5.4 Modelamiento en estado dinámico	23
2.6 Control del generador de inducción usando convertidores DC-AC o inversores	25
2.6.1 Tipos y configuraciones de inversores	25
2.6.2 Inversor de modulación ancho de pulso PWM	26
2.7 Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos NTCS DS 020-97-EM	30
2.7.1 Calidad del Producto para la tensión y frecuencia	30
CAPÍTULO III	
IMPLICANCIAS EN LA OPERACIÓN DE GENERADORES DE INDUCCIÓN	

3.1	Ventajas en el empleo de generadores asíncronos	32
3.2	Principales inconvenientes en el empleo de generadores asíncronos	32
3.2.1	Características de regulación de tensión y de frecuencia insatisfactorias	33
3.2.2	Requerimiento de una compensación de potencia reactiva externa	33
3.3	Evaluación y análisis de los inconvenientes encontrados	33
3.4	Objetivo del informe	33
3.5	Síntesis del informe	34
3.6	Limitaciones y exclusiones del presente informe	34
CAPÍTULO IV		
SISTEMA DE GENERACIÓN ORIGINAL		
4.1	Sistema de generación original sin control	35
4.1.1	Procedimiento de operación en una red aislada del sistema interconectado	36
4.1.2	Eficiencia de la bomba operada como turbina	37
4.1.3	Descripción de los elementos del sistema de generación original	38
CAPÍTULO V		
SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN Y FRECUENCIA PROPUESTO		
5.1	Sistema de Control propuesto	43
5.1.1	Principio de funcionamiento del sistema de control propuesto	44
5.1.2	Descripción de los elementos del sistema de control propuesto	47
5.2	Cálculos de los valores de los elementos del Sistema propuesto	50
5.2.1	Deslizamiento y potencia máxima de generación	50
5.2.2	Cálculo de la capacidad del banco de condensadores AC	50
5.2.3	Cálculo de la resistencia DC	51
CAPÍTULO VI		
SIMULACIÓN DEL SISTEMA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		
6.1	Esquema general utilizado	52
6.2	Operación del sistema de generación original (sin inversor PWM)	53
6.2.1	Gráficas de los resultados obtenidos en la simulación	53
6.2.2	Arranque y autoexcitación del generador	54
6.2.3	Conexión, incremento gradual y desconexión de carga trifásica resistiva	55
6.3	Operación del sistema de control de tensión y frecuencia propuesto	56
6.3.1	Gráficas de los resultados obtenidos en la simulación	56
6.3.2	Arranque y autoexcitación del generador	58

6.3.3	Carga del condensador DC	58
6.3.4	Activación del inversor y sincronización con el generador	59
6.3.5	Incremento de la velocidad del generador y generación de potencia en vacío	61
6.3.6	Conexión, incremento gradual y desconexión de carga trifásica resistiva	63
6.4	Análisis de los resultados obtenidos	64
6.4.1	Análisis de la operación del sistema de generación original	64
6.4.2	Análisis de la operación del sistema de control propuesto	67
6.4.3	Comparación gráfica del sistema original vs el sistema de control propuesto	69
CAPÍTULO VII		
ANALISIS ECONOMICO REFERENCIAL DEL SISTEMA DE GENERACION		
7.1	Costo estimado del Suministro de equipos de generación y control	71
7.2	Costo estimado del Montaje e instalación de equipos de generación y control	72
7.3	Costo estimado de la implementación del sistema de generación y control	72
CONCLUSIONES		73
ANEXOS		
Anexo A: Resultados experimentales referenciales		75
Anexo B: Prototipo de planta minihidroeléctrica controlada electrónicamente		78
Anexo C: Implementación de plantas minihidroeléctricas con bombas y motores de inducción operados a la inversa		80
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS		84

PRÓLOGO

Hoy en día el aprovechamiento eficiente y racional de pequeñas corrientes de agua para la generación de energía eléctrica a través de la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas, se ha convertido en un aspecto de gran oportunidad para incentivar el progreso de pequeñas comunidades ubicadas en zonas aisladas en un país como el nuestro en vías del desarrollo. Sin embargo, la escasa comercialización, la compleja implementación y los altos costos de sus equipos, han llevado a que esta actividad no sea aprovechada extensivamente.

El uso de generadores de inducción presenta un gran conjunto de ventajas como robustez, construcción simple, capacidad de autoprotección, niveles bajos de corriente de corto-circuito, poco mantenimiento, alta proporción potencia-peso (W/kg), costo relativamente bajo, gran disponibilidad, y la habilidad de generar potencia incluso cuando es impulsado a velocidad variable. A pesar de todas estas ventajas, sus aplicaciones presentan algunos inconvenientes, tales como sus características de regulación de frecuencia y tensión intrínsecamente insatisfactorias y el requerimiento de una externa compensación de potencia reactiva para mantener la excitación.

El objetivo del presente informe es el de comprobar técnicamente el uso de un sistema de control sencillo y efectivo para regular la tensión a frecuencia constante de un motor de inducción operado como generador y así disminuir los costos de complejidad e implementación. Una bomba hidráulica operada a la inversa como turbina y alimentada por una fuente hidráulica, será la que proporcionará la potencia mecánica al eje del generador, y así éste pueda entregar la potencia activa al recibir la excitación suficiente y su rotor sea impulsado a una velocidad mayor que la del campo magnético estático.

El control de tensión propuesto consiste en conectar a través de filtros inductivos el terminal AC de un inversor bidireccional de modulación de ancho de pulso tipo fuente de tensión (VS-PWM), a los bornes de un generador de inducción; y la conexión del terminal DC del inversor a un condensador DC, que será empleado como fuente de tensión. Así, el sistema está diseñado para funcionar bajo las siguientes condiciones: en una red aislada, en un rango de caudales, en un rango de valores de deslizamiento y potencia generada,

alimentando una carga máxima de 1230W, y potencia reactiva para la magnetización del generador será proporcionada por un banco de condensadores.

La generación de potencia eléctrica usando fuentes de energía renovable ha sido observada detenidamente desde los años 1970, debido a razones económicas y medio ambientales. En este sentido, se han realizado grandes esfuerzos para superar los inconvenientes de los generadores de inducción, aplicando convertidores electrónicos de potencia y técnicas de control de máquinas, desde entonces las máquinas de inducción son aquellas que mejor alcanzan los requerimientos de los sistemas de generación de velocidad variable. Es así que en Julio del año 2005, el Centro de Estudios de Energía del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, efectuando varias pruebas experimentales bajo el esquema mencionado, alcanzó resultados satisfactorios al emplear una bomba centrífuga operando en sentido inverso como turbina y utilizar un motor eléctrico que haga las veces de generador. Por otro lado en Agosto del año 1999, los doctores brasileños Enes Goncalves Marra y José Antenor Pomilio, lograron implementar experimentalmente la regulación de tensión y frecuencia por medio de un inversor VS-PWM, consiguiendo muy buenos resultados.

En el capítulo I del presente informe, se exponen los antecedentes de la generación hidráulica y las fuentes renovables de energía eléctrica, las minicentrales hidroeléctricas, y los antecedentes del sistema de control de tensión y frecuencia propuesto.

Luego el capítulo II, trata aspectos teóricos de las máquinas asíncronas como generadores, su operación, y las interfaces electrónicas de control como los inversores PWM aplicados a la regulación. A continuación, el capítulo III describe las ventajas y desventajas de utilizar motores asíncronos como generadores de inducción, y se plantea una alternativa de solución a fin de superar los inconvenientes.

En el capítulo IV, se presentan las características del sistema de generación original, y las consideraciones del uso de motores como generadores de inducción. Asimismo en el capítulo V, se describe el funcionamiento del sistema de control de tensión y frecuencia propuesto, y el cálculo de los valores de algunos elementos a emplear en la simulación. En el capítulo VI, se presenta la simulación del sistema propuesto utilizando simulaciones por software, y el análisis de los resultados mediante la comparación del sistema de generación original con el sistema de control propuesto.

Finalmente en el capítulo VII se muestran costos estimados de la implementación del sistema de generación y control de tensión y frecuencia propuesto.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes de la generación hidráulica

El aprovechamiento de los recursos hídricos para la generación de energía inició en los tiempos antiguos con el uso de ruedas hidráulicas muy rudimentarias, pero que permitían la producción de fuerza mecánica motriz y con ello disminuir el esfuerzo realizado por el hombre.

La evolución de las ruedas hidráulicas acompañó a la era industrial, inclusive antes de la llegada del motor a vapor. Con la revolución industrial y su fuerte demanda de energía, se incrementó el desarrollo tecnológico de los procesos de conversión de la energía, y fue así cuando la turbina superó a la rueda hidráulica a partir del inicio del siglo XIX.

Primero la fuerza motriz y luego la energía eléctrica, fueron los productos energéticos con que el recurso hídrico contribuyó y lo continúa haciendo hoy en día, junto con el progreso económico y la búsqueda de una mejor calidad de vida de las personas en el mundo.

El proceso de conversión de las fuentes hídricas más conocido en la actualidad, es la producción de energía eléctrica, y en donde el constante desarrollo de la tecnología ha permitido alcanzar altísimos niveles de eficiencia en la conversión de la energía hidráulica en energía eléctrica e inclusive en grandes escalas de producción eléctrica, en donde un claro ejemplo es el caso de la central hidroeléctrica Itaipú en Brasil cuya potencia instalada es de 12600 MW.

Los sistemas eléctricos han evolucionado hacia niveles crecientes de interconexión, primero regionales, luego nacionales y hoy en día internacionales. Los sistemas de potencia de las empresas generadoras eléctricas que se vinculan a estos sistemas interconectados son crecientes, tal que en países como Brasil, éstos poseen un muy alto potencial hídrico y muy escasos recursos de origen fósil.

Excepto Europa Occidental y USA con sus recursos hídricos fuertemente explotados, el resto del mundo mantiene aún grandes reservas hidráulicas todavía, tal como se aprecia en la figura 1.1, el continente de mayor potencial viene a ser Asia seguido de América del sur.

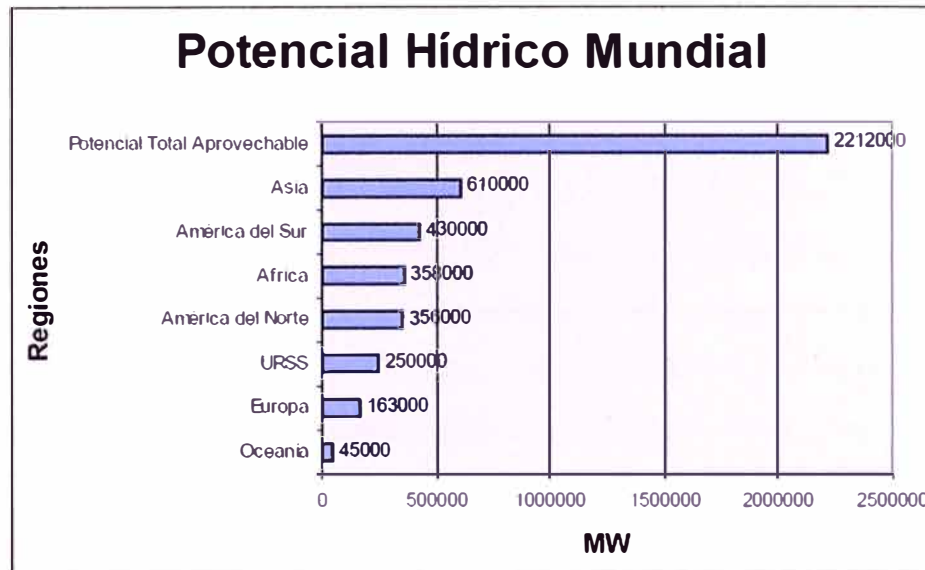


Fig.1.1 Potencial hídrico mundial en MW [1]

1.2 Generación hidráulica rural

No obstante, si la oferta hidráulica debe integrarse en sistemas eléctricos que operan grandes bloques de potencia, el papel de la generación hidráulica en pequeña escala como las plantas minihidroeléctricas, debe de considerar la relación entre el desarrollo de los sistemas eléctricos y la distribución de la población.

Para ello, los sistemas eléctricos interconectados han resuelto el abastecimiento de los centros urbanos, pero han penetrado parcialmente en las áreas rurales, quedando aún grandes áreas geográficas sin servicio eléctrico donde la población rural que las habita se encuentra en situación precaria, con niveles de actividad económica de subsistencia y altos índices de necesidades sociales básicas insatisfechas. Es decir, existe una estrecha relación entre las condiciones socioeconómicas de ésta población y la ausencia de una demanda que se exprese en términos de mercado para promover su abastecimiento.

América Latina, Asia y África concentran esta población sin servicio eléctrico, tal que de los 6000 millones de habitantes que poblaban el planeta al finalizar el siglo XX, había 2000 millones que no contaban con servicio eléctrico. Hoy en día las proporciones son semejantes, con una leve tendencia a agravarse. [1]

Áreas rurales con pobladores alejados de las redes de distribución, con requerimientos energéticos de calidad y cantidad insatisfechos, constituyen el ámbito principal donde la pequeña generación hidroeléctrica encuentra su aplicación potencial, siempre y cuando se cuente con recursos hídricos locales suficientes.

Éste es el ámbito principal donde las minicentrales hidroeléctricas tienen un rol asegurado y protagónico, siendo el sector objetivo del presente informe.

1.3 El papel de la máquina de inducción

La máquina de inducción ha sido usada desde principios del siglo XX. Sin embargo, la abundante producción de combustibles fósiles los llevó a su casi completa inutilización en los años 60's. Con el dramático incremento en el precio del petróleo en los años 70's, la máquina de inducción regresó a la escena. Ante costos de energía tan altos, la recuperación de energía llegó a ser parte importante de la economía de la mayoría de los procesos industriales. La máquina de inducción es ideal para tales aplicaciones debido a que requiere mínimo control o mantenimiento.

Para finales de los 80's la amplia distribución de la población alrededor del planeta, ha mejorado el transporte y la comunicación, permitiendo a la gente moverse lejos de las grandes concentraciones urbanas, y aumentando la importancia de la demanda de energía eléctrica de muchas comunidades aisladas.

En los años 90's, ideas como la generación distribuida comenzaron a ser discutidas por las compañías suministradoras y por los centros de investigación. Tomar conciencia general acerca de las fuentes de energía limitadas y finitas en el planeta, y las disputas internacionales sobre el medio ambiente, la seguridad global, y la calidad de vida, han creado una oportunidad para nuevas plantas, más eficientes, con menos contaminación al ambiente, con tecnologías de control avanzadas, robustas y modulares.

Hoy en día, la máquina de inducción usada como generador de inducción con sus requerimientos mínimos de mantenimiento y controles sencillos, es una solución para tales aplicaciones. Por su simplicidad y robustez, el generador de inducción es el candidato apropiado para plantas minihidroeléctricas.

Con el uso extensivo de la electrónica de potencia, computadoras, y microcontroladores electrónicos, se ha hecho más accesible el manejo de los generadores de inducción. El generador de inducción se encuentra siempre asociado con fuentes alternativas de energía, particularmente para pequeñas plantas de generación, ya que tiene un gran atractivo económico, tal que si es conectado a la red eléctrica u otras fuentes, fácilmente puede alcanzar los 100kW. Esquemas muy especializados con máquina de rotor devanado y realizados para aplicaciones específicas pueden alcanzar potencias aun mayores. Asimismo, la electrónica de potencia y la tecnología de microcontroladores han dado un empuje decisivo a los generadores de inducción, debido a que permiten controles muy avanzados y baratos, nuevas técnicas de compensación de potencia reactiva y de inyección de potencia a la red, entre otras características.

1.4 Electrificación Rural con Energía Minihidroeléctrica en el Perú

El Perú ha logrado un coeficiente de electrificación (pobladores con servicio eléctrico/población total) de 78% (para el año 2008) al nivel nacional, pero hay un gran problema de desigualdad entre áreas urbanas y rurales. Las áreas urbanas alcanzan el 90% de coeficiente de electrificación, mientras que las áreas de la Selva y Sierra quedan al 35%, donde vive la tercera parte de la población del país.

Si se espera introducir unas formas más eficientes de generación eléctrica a pequeña escala por medio de las energías renovables tales como la energía hidráulica y la energía solar en las áreas de la Selva y la Sierra, la ampliación de red requeriría montos enormes de fondos económicos y tiempo. Para hacer frente a la situación líneas arriba, el gobierno del Perú solicitó asistencia para un plan maestro para promover electrificación por energías renovables al Japón. En respuesta a esa solicitud, JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) llevó a cabo una investigación de formación de proyecto en noviembre de 2005 y una investigación preliminar en septiembre de 2006.

Las mayores capacidades hidroeléctricas en el Perú han sido desarrolladas en regiones montañosas, alcanzando aproximadamente al 70% de la capacidad de generación total (5,700 MW) al año 2003.

El rango de capacidad de la energía minihidroeléctrica abarca desde varias docenas a 500kW, siendo necesario que las minihidroeléctricas estén cerca de los lugares de los centros poblados debido a la adopción de mini-redes aisladas a fin de reducir el costo de construcción de las líneas eléctricas de distribución,

Por la razón expuesta, para identificar el potencial hidroeléctrica mini/micro, es necesario considerar no solo condiciones naturales tales como topografía y clima, sino también factores sociales como distancia entre el lugar de construcción y las localidades adyacentes y existentes infraestructuras.

La identificación de proyectos minihidroeléctricos se llevó a cabo mediante una investigación de proyectos existentes y estudios en el MEM. Los proyectos candidatos son 29 emplazamientos incluyendo dos de Estudio de Campo a nivel de Pre-Factibilidad. Los emplazamientos minihidroeléctricos con menos de 100 kW son 25 emplazamientos entre 29 proyectos. De los 4 emplazamientos restantes, 3 tienen una capacidad mayor a 200 kW y 1 mayor a 500 kW. La población beneficiaria de estos proyectos serán 519 poblados, aproximadamente 92,000 personas (18,498 viviendas \times 5 personas/viviendas) y la capacidad instalada total será de 2,655 kW. [2]

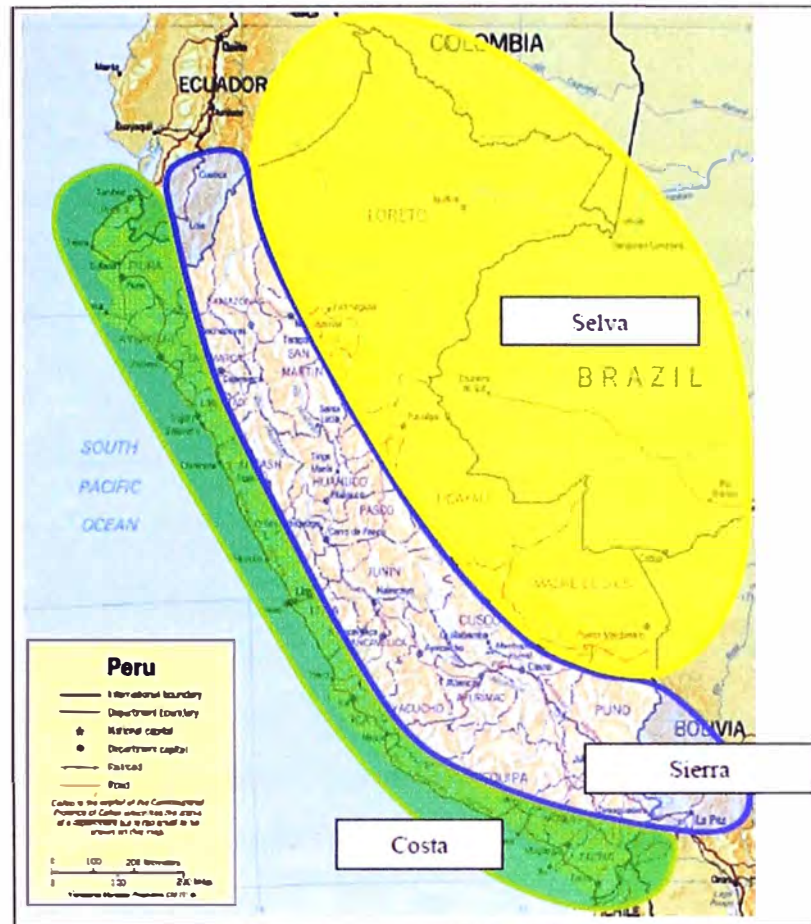


Fig.1.2 Distribución de Potenciales Hidroeléctricos en el Perú [2]

1.5 Antecedentes del sistema de minigeneración hidráulica en estudio

La generación de potencia eléctrica usando fuentes de energía renovable ha sido observada detenidamente desde los años 1970, debido principalmente a razones económicas y medio ambientales. Posteriormente con el empleo de las máquinas de inducción para la minigeneración hidráulica, se han realizado grandes esfuerzos para superar los inconvenientes en su desempeño, utilizándose para ello convertidores electrónicos de potencia y técnicas de control de máquinas. Desde entonces las máquinas de inducción son aquellas que mejor alcanzan los requerimientos de generación a velocidad variable.

En Agosto del año 1999, los doctores brasileños Enes Goncalves Marra y José Antenor Pomilio, lograron realizar simulaciones con software y pruebas experimentales en las cuales implementaron la regulación de tensión y frecuencia de la máquina de inducción aislada de una red eléctrica utilizada como generador (tipo jaula de ardilla trifásico), en base a un control electrónico que consistía en conectar a sus bornes un inversor bidireccional de modulación de ancho de pulso fuente de tensión (VS-PWM), y en donde el sistema es accionado por una pequeña turbina de eje no regulado. Luego de las

simulaciones realizadas y de llevar a cabo las pruebas experimentales, consiguieron resultados satisfactorios al alimentar cargas alternas.

En Julio del año 2005, el Centro de Estudios de Energía del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey en México, simularon una minicentral hidroeléctrica en donde se empleaba una bomba centrífuga operada en sentido inverso haciendo la función de turbina, y un motor asíncrono que hacía las veces de generador de inducción. Luego de efectuar varias pruebas experimentales bajo el esquema mencionado, alcanzaron resultados bastante alentadores. Sin embargo para que el sistema operase sin conexión a una red eléctrica, era necesario mantener constante la velocidad rotórica mediante la regulación manual de las válvulas de ingreso y descarga de la turbina, asimismo los rangos de valores de tensión y frecuencia entregada no eran valores estables.

La metodología propuesta en el presente informe, se basa principalmente en los dos estudios arriba mencionados, y en donde se comprobará mediante simulaciones que el motor de inducción al ser utilizado como generador alimentado por una bomba operada como turbina, posee una buena regulación de tensión y frecuencia al ser complementado con un sistema de control, y operará excepcionalmente durante un aumento de carga gradual y durante un rechazo de carga en una red aislada.

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Plantas minihidroeléctricas

La superficie terrestre está cubierta en un 71% de agua. La energía hidroeléctrica proviene indirectamente de la energía del sol, responsable del ciclo hidrológico natural. La radiación que procede de las fusiones nucleares que se producen en el sol calienta la superficie terrestre, ríos, lagos y océanos, provocando la evaporación del agua. El aire caliente transporta el agua evaporada en forma de nubes y niebla a distintos puntos del planeta, donde cae nuevamente en forma de lluvia y nieve. Una parte de la energía solar permanece almacenada en el agua de los ríos, los lagos y los glaciares.

Las centrales y minicentrales hidroeléctricas transforman esa energía en electricidad, aprovechando la diferencia de desnivel existente entre dos puntos. La energía se transforma primero en energía mecánica en la turbina hidráulica, ésta activa el generador, que transforma en un segundo paso la energía mecánica en energía eléctrica.

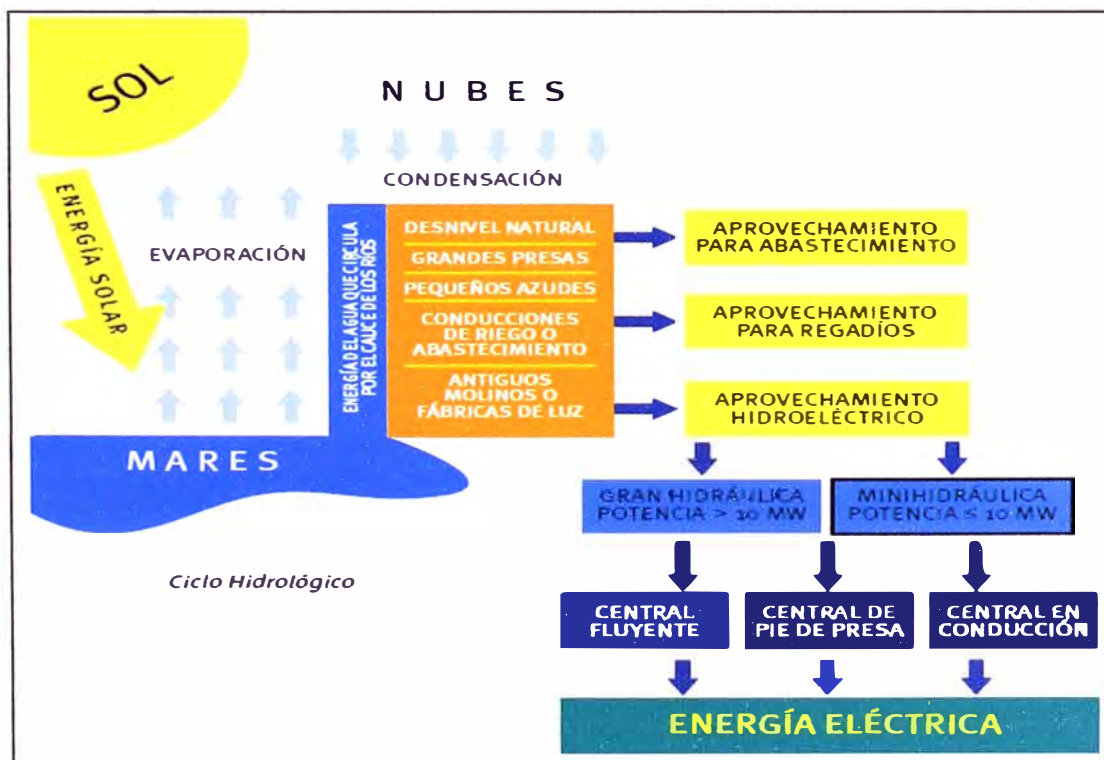


Fig.2.1 Esquema de la generación hidráulica [3].

2.1.1 Clasificación de las plantas minihidroeléctricas

En muchos países, una planta pequeña de generación es aquella que genera hasta 10,000 kW de potencia de alguna fuente de energía que se encuentra en la naturaleza. Por mucho tiempo, esta clasificación fue aplicada a plantas hidroeléctricas, pero recientemente el término *plantas pequeñas* ha incluido tres rangos diferentes de generación de potencia: micro, mini, y pequeña. Las microplantas (hasta 100 kW) se distinguen de otras, porque son mucho más simples de instalar, que las mini-plantas (entre 100 kW y 1,000 kW), las plantas pequeñas (entre 1,000 kW y 10,000 kW) y grandes plantas (mayores a 10,000 kW). Las plantas de generación mini, pequeña y grande son usualmente comerciales y abastecen a muchos consumidores. Aunque los generadores usados en estas plantas de generación pueden ser sincrónicos o asíncronos, aislados o conectados directa o indirectamente a la red eléctrica, existe una preocupación por la calidad y la frecuencia del voltaje generado. En algunos países las micro plantas tienen una fuerte dependencia de la carga conectada a través de sus terminales, la cual puede afectar su control de voltaje y frecuencia. Además, el uso de varios generadores permite interrupciones programadas de carga para mantenimiento. Estas plantas pueden suministrar potencia a cargas aisladas o a cargas interconectadas. Conectadas al sistema, se consideran más como cargas que como puntos de generación.

Las plantas de generación mini, pequeña y grandes son fundamentalmente diferentes, porque son estrictamente para aplicaciones comerciales o comunitarias, las cuales requieren de controles rígidos de voltaje y frecuencia. La inversión necesaria, las implicaciones técnicas, y los costos operacionales son más altos y muy difíciles de asumir para un consumidor individual.

Por otro lado, las microplantas son independientes y a menudo la única solución para lugares remotos, tal que cuando operan conectados a la red eléctrica, su propósito es reducir el costo de la energía eléctrica y debiendo existir una negociación con el distribuidor de energía local con respecto al costo de un kW-h generado, condiciones de seguridad, tolerancias de voltaje y la frecuencia, entre otros asuntos.

2.2 Bombas centrífugas como turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es el elemento clave de la minicentral. Aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua, transformándola en un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica. Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción.

En una turbina de acción la presión del agua se convierte primero en energía cinética. En una turbina de reacción la presión del agua actúa como una fuerza sobre la superficie de los álabes y decrece a medida que avanza hacia la salida.

El presente informe consiste en utilizar una bomba hidráulica centrífuga que haga las veces de turbina en una planta minihidroeléctrica, la cual accionará la flecha del generador.

La bomba centrífuga la cual a su vez sería movida por un flujo hidráulico en sentido inverso, es decir un flujo aplicado en la “descarga” de la bomba y desfogado a través de la “succión”. De esta forma el fluido entregará su potencia al impulsor de la bomba y este a su vez transmitirá potencia mecánica a la flecha del generador de inducción al que se encuentra acoplada. Es decir la bomba estará operando como una turbina hidráulica.

2.3 Motores como generadores de inducción

El generador es la máquina que transforma la energía mecánica de rotación de la turbina en energía eléctrica. El generador basa su funcionamiento en la inducción electromagnética. El principio de su funcionamiento se basa en la ley de Faraday, mediante la cual, cuando un conductor eléctrico se mueve en un campo magnético se produce una corriente eléctrica a través de él.

El generador, o alternador, está compuesto de dos partes fundamentales:

- Rotor o inductor móvil: Su función es generar un campo magnético variable al girar arrastrado por la turbina.
- Estator o inducido fijo: Sobre el que se genera la corriente eléctrica aprovechable.

En centrales menores de 1000kW la tensión de trabajo del generador es de 400V ó 660V. Para potencias más elevadas la generación se produce en media tensión (3000V, 5000V ó 6000V). El generador puede ser de dos tipos: síncrono o asíncrono.

El generador de inducción, debido a la simplicidad, robustez y bajo costo de los clásicos motores eléctricos, éstos han venido utilizándose como generadores eléctricos sobre todo en centrales de pequeña potencia. Para ello es necesario que el par mecánico comunicado al rotor produzca una velocidad de giro superior a la de sincronismo.

Este exceso de velocidad produce un campo giratorio excitador. Es importante que la diferencia entre las velocidades de funcionamiento y la de sincronismo sea pequeña, para reducir las pérdidas en el cobre del rotor. El generador toma la corriente de la red para la creación del campo magnético. También es necesaria la colocación de una batería de condensadores que compense la energía reactiva demandada.

El uso de este tipo de generadores no precisa regulador de velocidad en la turbina. Para arrancar el grupo se abre el distribuidor de la turbina hasta que se llega a una velocidad superior a la de sincronismo (aunque próxima a la misma) y en este momento se conecta a la red por medio de un interruptor automático.

Los motores asíncronos o de inducción, son prácticamente motores trifásicos, basados en el accionamiento de un campo giratorio, y formados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: uno fija, y otro móvil (estator y rotor respectivamente).

El devanado del rotor, que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste de conductores de cobre o aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la “jaula de ardilla” o bien en uno de los extremos en el caso del rotor devanado.

Los motores de inducción de rotor devanado son menos utilizados, debido a su mayor costo, y a que requieren de más mantenimiento que los de jaula de ardilla.

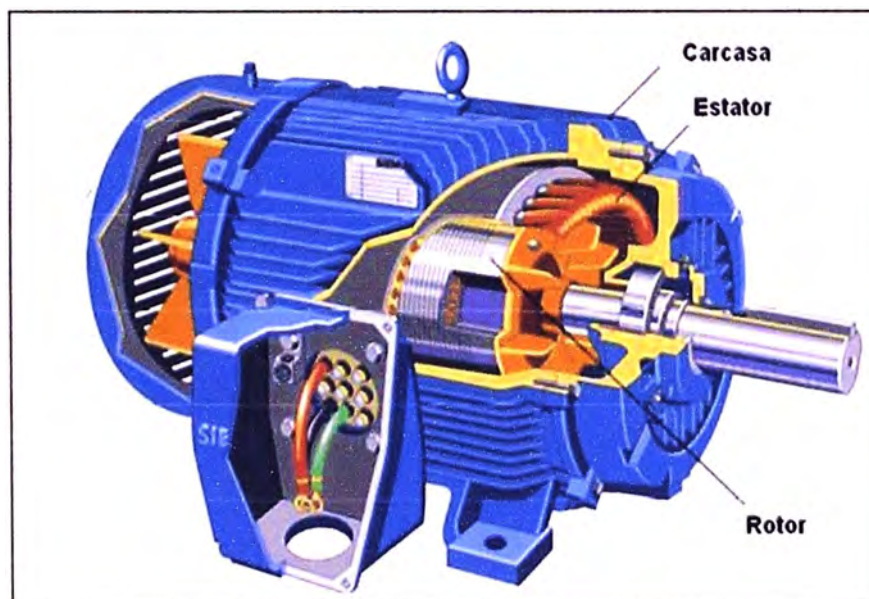


Fig.2.2 Motor de inducción usado como generador

2.4 Generadores de inducción

Un generador de inducción necesita para asegurar su magnetización, tomar una cierta potencia reactiva de la red, aunque existe la posibilidad de acoplarlo a un banco de condensadores, que le proporcionen la energía magnetizante que necesita. La red es también la que marca la frecuencia, y el generador aumenta su deslizamiento a medida que aumenta la potencia suministrada por la turbina. Su funcionamiento es absolutamente estable y hace innecesaria la existencia de un regulador de velocidad en la turbina.

El generador asíncrono presenta la ventaja adicional de no necesitar excitatriz, lo que simplifica el equipo y facilita las maniobras secuenciales de arranque. Para ello se actúa sobre la admisión de la turbina, acelerándola hasta que el generador alcance el 90-95% de su velocidad de sincronismo, momento en el que un relé de velocidad da la orden de cierre del interruptor de línea. El generador pasa rápidamente a la velocidad de hipersincronismo, alcanzando la velocidad necesaria para que se igualen los pares motor y resistente en la zona de funcionamiento estable [4].

2.4.1 Curva de magnetización y autoexcitación

La curva de magnetización, también conocida como la curva de excitación o saturación, está relacionada directamente con la calidad del hierro, dimensiones del núcleo, geometría, y el bobinado de espiras; en otras palabras, las características del generador de inducción determinan la tensión de salida para una determinada corriente de magnetización a través de los bobinados, tal como se muestra en la siguiente figura:

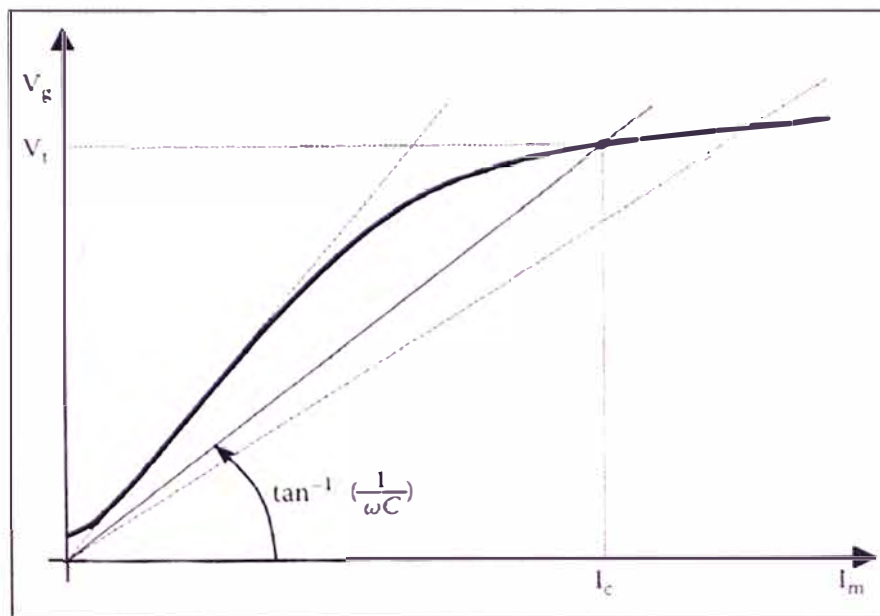


Fig.2.3 Curva de magnetización del generador de inducción

La curva de saturación es representada por una polinomial de cuarto grado o por una expresión no-lineal como la siguiente:

$$Lm = a_0 + a_1 V_{ph} + a_2 V_{ph}^2 + a_3 V_{ph}^3 + a_4 V_{ph}^4 \quad (2.1)$$

$$Xm = F \omega_s L_m = \frac{V_g}{I_m} = F (K_1 e^{K_2 I_m^2} + K_3) \quad (2.2)$$

La operación del generador de inducción como una función de la tensión en sus terminales (para una frecuencia dada) necesitará la corriente de magnetización I_m para describir la operación. Esto es determinado alimentando la máquina como un motor de inducción sin

carga y midiendo la corriente como una función de la variación de tensión en los terminales. Esta curva se inicia en el valor del magnetismo residual (corriente cero) existente antes del inicio de la prueba de la curva de histéresis en el hierro de la máquina.

Es interesante en este punto comparar al generador de inducción y al generador DC; la capacitancia de excitación del generador de inducción toma el lugar de la resistencia de campo del generador DC. Cuando el generador DC shunt se inicia, el magnetismo residual en el campo genera una tensión inicial la cual produce una corriente de campo que de inmediato produce más tensión de campo y así sucesivamente.

El proceso continúa hasta que el hierro esté saturado. Este es el proceso de autoexcitación muy similar al que pasa con en el generador de inducción, como veremos a continuación. En este caso, el magnetismo residual en el hierro produce una pequeña tensión que provoca una corriente capacitiva (una corriente adelantada). Esta corriente produce un incremento de de tensión que provoca un alto incremento de la corriente capacitiva, y así sucesivamente, hasta la saturación del hierro del campo magnético. Sin magnetismo residual, ni el generador DC ni el generador de inducción pueden producir tensión alguna.

Es importante enfatizar que es muy difícil perder magnetismo residual completamente, debido a que un valor mínimo siempre permanece. Sin embargo, en el caso de pérdida completa, hay cuatro técnicas comúnmente usadas para recuperarla según la referencia [5]:

- Hacer rotar a la máquina sin carga y a velocidad elevada hasta que el magnetismo residual sea recompuesto; sólo en casos extremos no es posible.
- Use una batería para causar una sobrecorriente en uno de los bobinados de la máquina.
- Mantener un condensador de alta capacitancia cargado (puede ser uno de los tipos electrolíticos) para causar una sobrecorriente como en el método anterior.
- Usar una fuente rectificadora de la red para sustituir la batería.

Una manera de obtener una curva de magnetización más coherente con la dependencia natural de la frecuencia de los parámetros del motor de inducción, es usar una segunda máquina acoplada a su eje, garantizando así una rotación constante durante toda la prueba.

Para una operación del generador en forma aislada, éste debería ser conectado a un banco trifásico de capacitores. Como la curva de excitación, la reactancia capacitiva será una línea recta pasando a través de cero y cuya pendiente es:

$$X_c = \frac{1}{\omega * C} \quad (2.3)$$

Como fue mencionado, la corriente de magnetización se retrasa detrás de la tensión en los terminales en casi 90° , dependiendo de las pérdidas del motor en una condición sin carga mientras que la corriente a través del capacitor es aproximadamente 90° adelantado.

El valor de C puede ser escogido para una rotación dada de una manera tal que la línea recta de la reactancia capacitiva intercepta la curva de magnetización en el punto de la tensión nominal deseada (V_{rated}). Esto significa que la intersección de estas dos líneas es el punto en el cual la potencia reactiva necesaria del generador es suministrada sólo por los capacitores (el punto de resonancia). Por lo tanto, para lograr el proceso de excitación, este valor debería estar entre el ángulo de la línea recta pasando a través del origen y la tangente a la parte más inclinada de la curva de excitación (la línea del entrehierro), pasando también a través del origen. La corriente correspondiente al punto de intercepción no debería ser muy superior a la corriente nominal de la máquina. En el primer caso, la tensión de salida será inestable, debido a que existen infinitos puntos comunes entre las dos líneas. El segundo extremo es justificado por la máxima capacidad de corriente que el bobinado del motor puede soportar.

Note que en la figura 2.3, la curva de magnetización no pasa a través de cero, lo cual es muy típico en las pruebas de laboratorio ya que el núcleo es raramente completamente desmagnetizado en estas pruebas. Este desplazamiento de cero es debido al magnetismo residual que debería ser corregido para compensar la distorsión.

También la inductancia mutua es esencialmente no-lineal. Para computación numérica esto debería ser determinado para cada valor de la corriente de magnetización instantánea I_m . Para solucionar este problema se sugiere que la curva no-lineal de la máquina puede ser inicialmente obtenida y luego, la tensión de terminales encontrada es dividida por el producto del tiempo de la corriente de magnetización $2\pi * f_{base}$.

2.5 La máquina de inducción

La máquina de inducción es usada en una amplia variedad de aplicaciones basadas en la conversión de energía eléctrica a trabajo mecánico, bombeo, fundición de acero, y control de grúas son unas de las tantas aplicaciones de un motor de inducción. En pequeña escala, el servomotor de dos fases es usado en sistemas de control de seguimiento de posición, y los motores de inducción monofásicos son ampliamente usados en aparatos electrodomésticos y herramientas.

Las máquinas de inducción trifásicas giran a velocidad asíncrona, operando como motor cuando giran con una velocidad menor a la velocidad sincrónica, y operando como

generador cuando giran a una velocidad mayor a la velocidad sincrónica. La máquina de inducción es menos costosa que sus equivalentes en tamaño (potencia) de máquinas sincrónicas o máquinas de corriente directa. La máquina de inducción es robusta y requiere de muy poco mantenimiento. Sin embargo, su velocidad no es tan fácil de controlar como en un motor de corriente directa, además de que requieren de una corriente de arranque grande, típicamente de 6 a 8 veces la corriente de plena carga.

2.5.1 Construcción

El estator de una máquina de inducción es físicamente igual al de una máquina sincrónica pero la construcción del rotor es diferente. El rotor de la mayoría de las máquinas de inducción no se encuentra equipado con arrollamientos; en su lugar, la corriente fluye en barras de cobre o aluminio, las cuales están uniformemente distribuidas e incrustadas en un material ferromagnético, con todas las barras conectadas a un anillo común en cada extremo del rotor. Este tipo de configuración es el rotor de jaula de ardilla. Otra consideración es que en una máquina práctica, los conductores del rotor están a menudo sesgados. Esto es, los conductores no están colocados en el plano de rotación del rotor, sino ligeramente sesgados con respecto al eje de rotación. Este tipo de arreglo de conductores ayuda a reducir la magnitud de los pares armónicos debidos al contenido armónico de las ondas de la fuerza magnetomotriz.

El otro tipo de rotor es el rotor devanado. Un rotor devanado tiene un grupo completo de devanados trifásicos que son las imágenes especulares de los devanados del estator. Las fases del rotor están conectadas usualmente en Y (estrella), y los extremos de las tres terminales del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor; los devanados del rotor están cortocircuitados a través de escobillas montadas en los anillos rozantes. Puede conectarse una resistencia adicional externa a los devanados del rotor a través de los anillos rozantes para obtener un par de arranque mayor, y así modificar la característica par-velocidad de la máquina.

Las máquinas de inducción de rotor devanado son más costosas que las de rotor de jaula de ardilla y requieren mucho más mantenimiento, debido al desgaste asociado a sus escobillas y anillos rozantes. Como resultado de ello, las máquinas de inducción de rotor devanado son poco utilizadas.

La característica distintiva de la máquina de inducción es que las corrientes del rotor son inducidas electromagnéticamente desde el estator, esta es la razón de la denominación “máquina de inducción”.

2.5.2 Principio de funcionamiento y deslizamiento

Cuando el estator de una máquina de inducción trifásica se conecta a una fuente de potencia trifásica de frecuencia eléctrica f_e , un conjunto trifásico de corrientes fluye por los devanados del estator y se establece un campo magnético giratorio. Estas corrientes trifásicas suministran la potencia reactiva necesaria para establecer el campo magnético giratorio así como la potencia activa consumida por el motor.

La velocidad del campo magnético giratorio está determinada totalmente por la frecuencia de la fuente de potencia trifásica y es conocida como la velocidad sincrónica. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por:

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad (2.4)$$

Donde f_e es la frecuencia eléctrica en Hz de la red de suministro, P es el número de polos de la máquina y n_s está dado en *r.p.m.* Cuando existe un movimiento relativo entre el campo magnético del estator y el rotor, se inducen voltajes en los devanados (barras conductoras) del rotor. La frecuencia f_r (Hz), de los voltajes inducidos en el rotor depende de la velocidad relativa entre el campo magnético del estator y el rotor.

La interacción de las corrientes del rotor con el campo magnético del estator produce un par que acelera el rotor en la dirección de rotación del campo magnético.

Conforme la velocidad del rotor n_r se aproxima a la velocidad n_s del campo magnético del estator, los voltajes y corrientes inducidos se aproximan a cero. Para que la máquina desarrolle un par positivo n_r debe ser menor que n_s (funcionamiento como motor).

La magnitud de las corrientes que fluyen en los circuitos del rotor está determinada por la magnitud de los voltajes inducidos en el rotor y la impedancia del rotor a la frecuencia de deslizamiento. Puesto que el comportamiento de una máquina de inducción depende del voltaje y la corriente del rotor, con frecuencia es más lógico hablar de su velocidad relativa. En general se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético en el entrehierro. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la del rotor:

$$n_{des} = n_s - n_r \quad (2.5)$$

Donde:

- n_{des} es la velocidad de deslizamiento de la máquina
- n_s es la velocidad del campo magnético del entrehierro
- n_r es la velocidad mecánica del eje del motor

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es *el deslizamiento*, el cual es la velocidad relativa expresada sobre una base en por unidad o en porcentaje:

$$S = \frac{n_{des}}{n_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.6)$$

La frecuencia f_r de los voltajes inducidos en el rotor es igual a la frecuencia de deslizamiento $S \cdot f_e$. Con la máquina en reposo n_r es igual a cero ($S = 1$), por lo que la frecuencia de deslizamiento en el arranque de la máquina es igual a f_e . Conforme el motor se acelera hacia la velocidad sincrónica el deslizamiento disminuye. Con el flujo de corriente en el estator, las corrientes del rotor establecen su propio campo magnético que gira a una velocidad $n_2 = S n_s$, la cual corresponde a la frecuencia de las corrientes del rotor. Por otra parte, el rotor por sí mismo está rotando a una velocidad n_r . Por consiguiente, la velocidad absoluta del campo magnético del rotor respecto a un punto fijo en el espacio y también con respecto al estator es igual a la velocidad sincrónica. En vacío, la máquina opera con un deslizamiento muy pequeño, casi despreciable.

Si una carga mecánica es aplicada al eje de la máquina, el deslizamiento se incrementa (la velocidad del rotor disminuye) de tal forma que los voltajes y corrientes inducidos producen el par requerido por la carga. De esta manera la máquina operará como motor si $n_r < n_s$. Si el rotor es impulsado por un primo motor a una velocidad mayor que la del campo magnético del estator, el deslizamiento es negativo (la velocidad del rotor es mayor que la velocidad del campo magnético del estator, $n_r > n_s$). La polaridad de los voltajes inducidos se invierte y el par resultante es contrario a la velocidad de rotación y la máquina operará como generador.

Si bajo la influencia de alguna fuerza externa el rotor de una máquina de inducción comienza a girar en sentido contrario al de rotación del flujo magnético, la energía en este caso es alimentada a la máquina de inducción desde dos fuentes, energía eléctrica del circuito de potencia y energía mecánica de la máquina motriz.

A este modo de funcionamiento se le denomina condición de freno electromagnético $n \leq 0$.

2.5.3 Modelamiento en estado estacionario

El funcionamiento de la máquina de inducción es esencialmente el mismo que el de un transformador considerando al estator como primario y al rotor como secundario, que en el caso general puede girar a una velocidad n_r .

En muchos casos resulta más cómodo considerar no la máquina real de inducción que representa un sistema de dos (o en el caso general varios) circuitos enlazados

electromagnéticamente, sino un sistema eléctrico de un circuito equivalente en estado estacionario con el rotor referido al estator y similar al circuito de un transformador.

Para poder llegar al circuito requerido, es necesario presentar el circuito realmente existente en donde la representación de los flujos de una máquina de inducción con rotor en rotación es [6]:

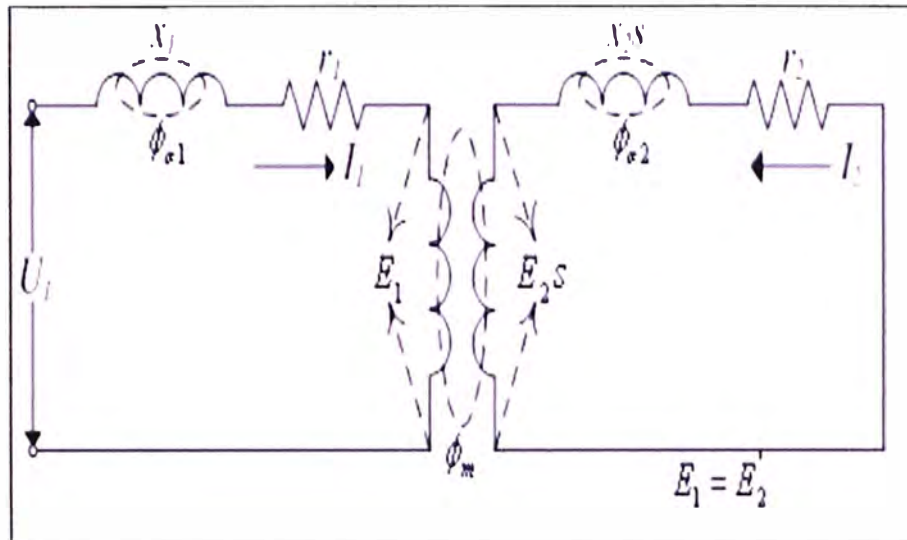


Fig.2.4 Concepto físico de acoplamiento de los circuitos primario y secundario

Donde r_1 y x_1 , son la resistencia y reactancia del estator y r_2 y x_2 , son la resistencia y reactancia del rotor respectivamente, E_1 y E_2' son la fuerza electromotriz (f.e.m.) producida en el circuito primario y la f.e.m. inducida en el circuito secundario referida al primario, respectivamente. Los circuitos primario y secundario de la máquina están acoplados por medio del flujo de inducción mutua Φ_m , que cuando el rotor está girando induce en el circuito secundario la f.e.m. $E_{20} = E_2 S$. Esta f.e.m. produce en el circuito secundario la corriente determinada por la siguiente igualdad:

$$I_2 = \frac{E_2 S}{Z_2} = \frac{E_2 S}{r_2 + jx_2 S} \quad (2.7)$$

Para poder conseguir un circuito equivalente referido a un rotor fijo, es necesario que la ecuación (2.7) deba reescribirse mediante la siguiente ecuación:

$$I_2 = \frac{E_2 S}{r_2 + jx_2 S} = \frac{E_2}{\frac{r_2}{S} + jx_2} \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) tiene una interpretación física que puede ser formulada como sigue: cuando el rotor está girando, en el circuito secundario existe ahora la f.e.m. E_2 de frecuencia f_e , en lugar de $E_2 S$ de frecuencia $f_e \cdot S$ correspondiente al rotor móvil. Por consiguiente, en lugar de la reactancia $x_2 S$ correspondiente al rotor en rotación, en el

circuito secundario actúa la reactancia x_2 correspondiente al rotor fijo. Estando el rotor fijo, para que circule por el circuito secundario la corriente I_2 del mismo valor y fase con respecto a E_2 , es necesario insertar en lugar de la resistencia r_2 (actuante cuando el rotor está girando), una nueva resistencia igual a:

$$\frac{r_2}{S} = r_2 + r_2 \frac{1-S}{S} \quad (2.9)$$

En ambos casos el desfase de la corriente respecto a la f.e.m. que la produce será el mismo.

En el primer caso:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2 S}{r_2} \quad (2.10)$$

Y en el segundo caso:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi_2 &= \frac{x_2}{r_2 / S} \\ &= \frac{x_2 S}{r_2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Evidentemente, en este caso también se mantienen invariables la magnitud y la fase de la corriente del estator I_1 y, por consiguiente, la potencia del circuito que consume la máquina, o bien la potencia que le entrega ésta no varía. Como las pérdidas eléctricas en los devanados primario y secundario siguen siendo las mismas que antes, la potencia desarrollada por el motor en su eje durante la rotación será igual a la potencia consumida en la resistencia adicional $r_2(1-S)/S$. Este concepto permite analizar, en lugar de un motor en rotación, un motor en reposo y tener la resistencia activa adicional indicada, siendo la potencia consumida en ésta igual a la potencia mecánica desarrollada por el rotor durante su rotación. Cuando una máquina de inducción funciona como generador ($-\infty < S < 0$), o actúa como freno electromagnético ($1 < S < \infty$), la resistencia adicional $r_2(1-S)/S$ es negativa.

Físicamente éste corresponde al hecho de que en estas condiciones la máquina consume potencia mecánica en el eje igual a $P = m_2 I_2^2 r_2 (1-S)/S$ donde m_2 es el número de fases. En comparación con las condiciones de motor, el sentido del flujo de potencia se invierte ahora, debido a lo cual la potencia P debe ser considerada también negativa.

El circuito equivalente de la Figura 2.4 puede ser sustituido por el circuito equivalente de la Fig. 2.5 de un transformador estático con una resistencia adicional $r_2(1-S)/S$:

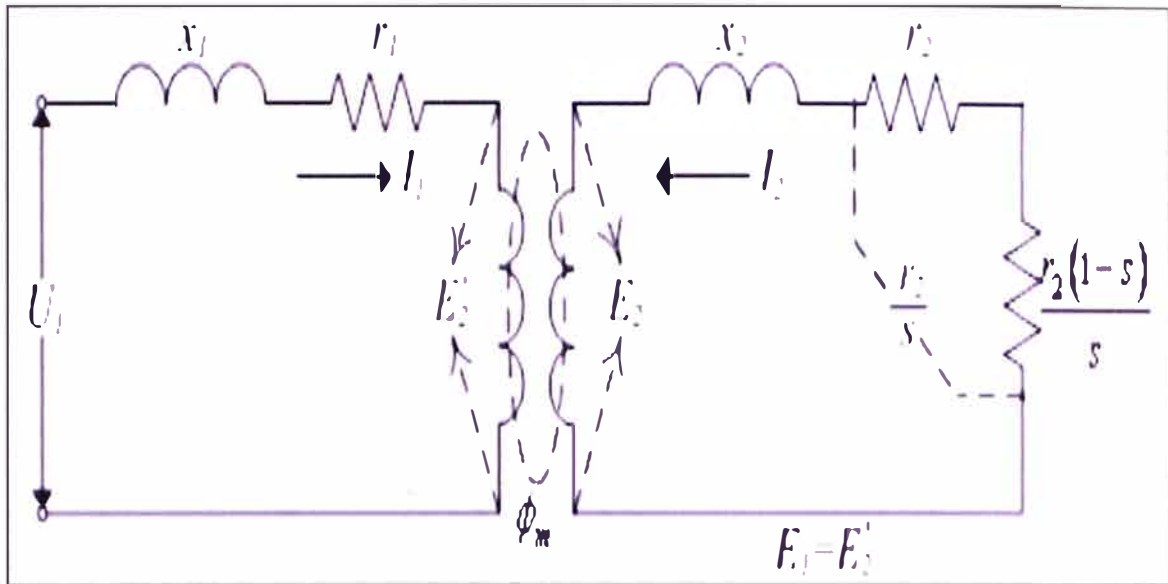


Fig.2.5 Circuito equivalente reducido a las condiciones de rotor fijo o en reposo

Para transformar el circuito equivalente de la Fig. 2.5 en un circuito equivalente en estado estacionario con el rotor referido al estator y similar al circuito de un transformador, el secundario debe ser referido al primario. En este caso los valores referidos, denotados por el apóstrofe ('), significa que los valores del rotor son referidos al estator:

$$E_2' = k_e E_2; \quad (2.12)$$

$$I_2' = I_2 / k_i; \quad (2.13)$$

$$x_2' = k_e k_i x_2 = k x_2; \quad (2.14)$$

$$r_2' = k_e k_i r_2 = k r_2; \quad (2.15)$$

Donde k_e, k_i y k son: el factor de transformación de la f.e.m., el factor de transformación de corrientes y factor de referencia de la resistencia respectivamente. El valor de la corriente secundaria I_2' referido al circuito primario se determina mediante el valor referido de f.e.m. E_2' , y los valores referidos de la resistencia del secundario, como sigue:

$$I_2' = \frac{E_2'}{\frac{r_2'}{s} + jx_2'} = \frac{E_2'}{Z_2'} \quad (2.16)$$

Donde:

$$Z_2' = \frac{r_2'}{s} + jx_2' \quad (2.17)$$

El desfase de la corriente secundaria referida I_2' con respecto a la f.e.m. secundaria referida E_2' es igual al desplazamiento de la corriente I_2 con respecto a la f.e.m. E_2 . Como

entre los terminales del circuito magnetizante de primario y secundario de la Fig. 2.5 obtenemos la misma tensión $E_1 = E_2'$, los puntos comunes equivalentes de ambos circuitos se pueden unir y resulta el circuito equivalente representado en la Fig. 2.6:

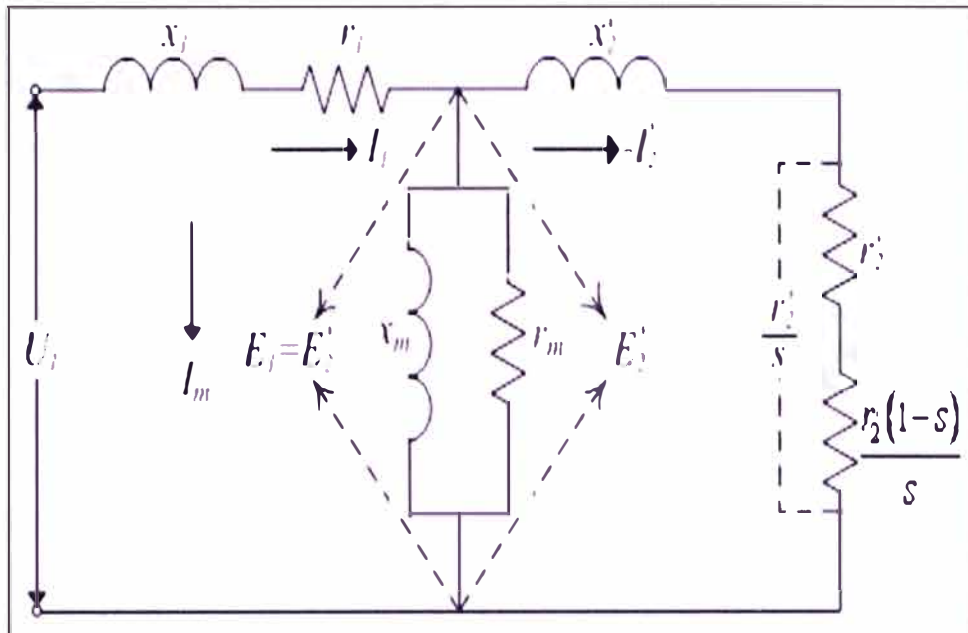


Fig.2.6 Circuito de la máquina de inducción similar al de un transformador

En el circuito de la Fig. 2.6, despreciando la resistencia del entrehierro r_m , por ser de valores muy pequeños, tenemos el siguiente circuito de la máquina de inducción en estado estacionario de rotor (secundario) referido al estator (primario), y cuyo esquema será utilizado en el modelamiento del generador de inducción del presente informe y de las simulaciones realizadas:

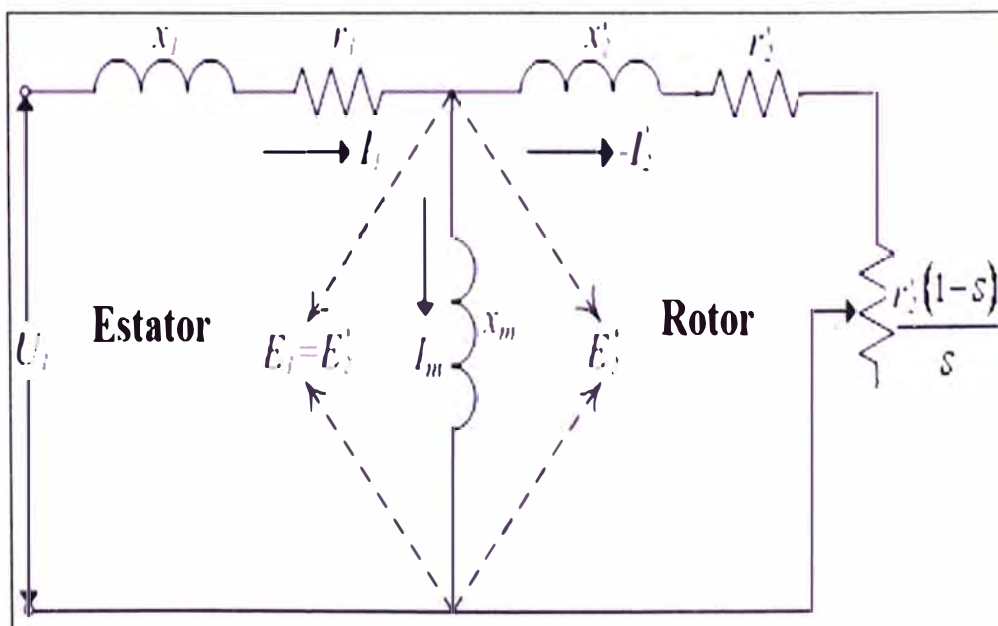


Fig.2.7 Circuito equivalente de la máquina de inducción utilizado

2.5.4 Modelamiento en estado dinámico

El comportamiento dinámico de la parte eléctrica de la máquina es representado por un modelo de cuarto orden, y la parte mecánica por un sistema de segundo orden. Todas las variables eléctricas y parámetros son referidos al estator. Esto es indicado por el apóstrofe en las ecuaciones de la máquina dadas líneas abajo. Todos los valores del rotor y del estator se encuentran en las coordenadas referenciales arbitrarias de dos ejes (coordenadas d-q).

Los subíndices usados son los siguientes:

- d es el valor en el eje d
- q es el valor en el eje q
- r es el valor en el rotor
- s es el valor en el estator
- l es la inductancia de fuga
- m es la inductancia de magnetización

El modelamiento dinámico del sistema eléctrico, es el siguiente [7]:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (2.18)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (2.19)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (2.20)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (2.21)$$

$$T_e = 1.5 p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (2.22)$$

Donde los flujos y las inductancias son los siguientes:

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (2.23)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (2.24)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.25)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.26)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.27)$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m \quad (2.28)$$

De las ecuaciones arriba mencionadas, podemos decir que el circuito equivalente para el

sistema en el eje q, es el siguiente:

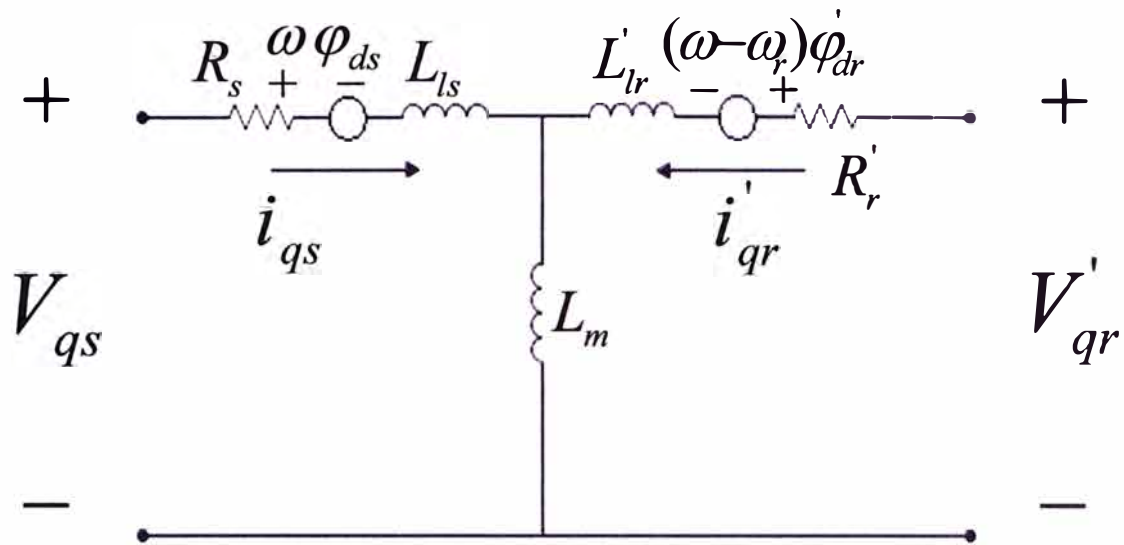


Fig.2.8 Circuito equivalente dinámico en el eje q

Asimismo, tenemos que el circuito equivalente para el sistema en el eje d, es el siguiente:

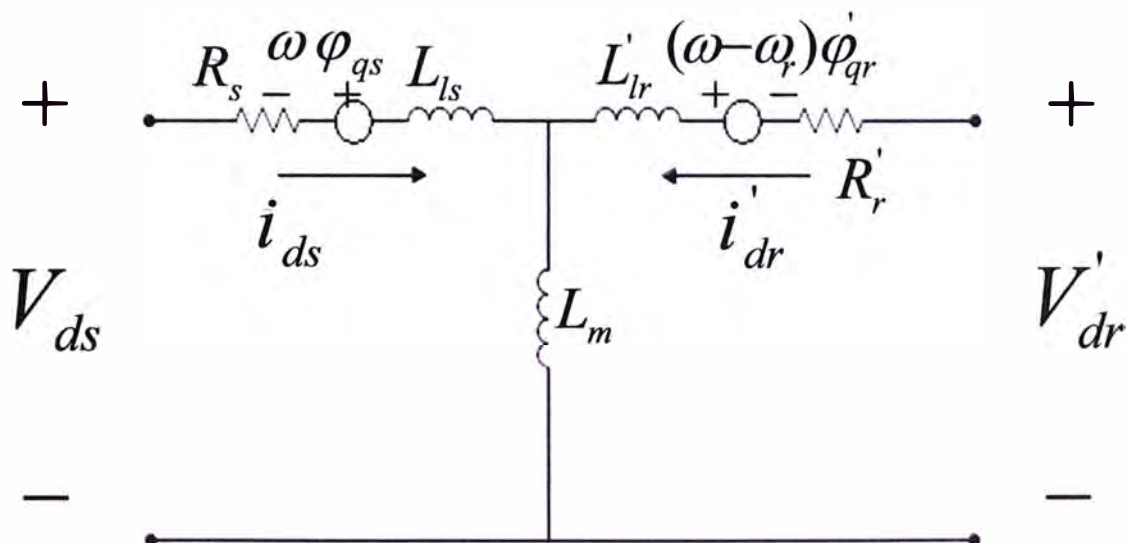


Fig.2.9 Circuito equivalente dinámico en el eje d

El modelamiento dinámico del sistema mecánico, es el siguiente:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m) \quad (2.29)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.30)$$

El modelo dinámico de la máquina de inducción arriba presentado, será utilizado por el generador de las simulaciones presentadas en el penúltimo capítulo del presente informe, para las condiciones dinámicas o transitorias de su operación.

2.6 Control del generador de inducción usando convertidores DC-AC o inversores

Los inversores son convertidores estáticos de energía que convierten la tensión DC en tensión AC, de amplitud y frecuencia fijas o variables, a fin de alimentar una carga en alterna regulando la tensión, la frecuencia o ambas, y transfiriendo potencia desde una fuente de continua a una carga alterna.

2.6.1 Tipos y configuraciones de inversores

Los inversores se clasifican en inversores fuente de tensión y en inversores fuente de corriente, según el tipo de fuente al que está conectado que puede ser una de tensión constante o una de corriente constante. Asimismo, existen tres configuraciones:

- Con transformador de toma media (push-pull).
- Con batería de toma media (medio puente).
- Configuración en puente completo.

Siendo las tres formas más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente suministrada por la fuente DC con la electrónica de potencia actual. Cada una con ventajas e inconvenientes, independientemente de los semiconductores empleados en su realización y de su circuitería auxiliar de excitación y bloqueo.

Las figuras 2.10 y 2.11 muestran las configuraciones push-pull y medio puente junto con la forma de onda de salida correspondiente, en donde los interruptores S, pueden ser considerados como las llaves de potencia denominadas IGBT's. En el caso de la configuración push-pull se debe tener en cuenta la relación de espiras entre cada uno de los primarios y el secundario. La topología en medio puente se puede implementar con una batería y dos condensadores en toma media.

La figura 2.12 muestra la configuración en puente completo, y en donde se puede intuir y deducir el funcionamiento de las dos anteriores configuraciones.

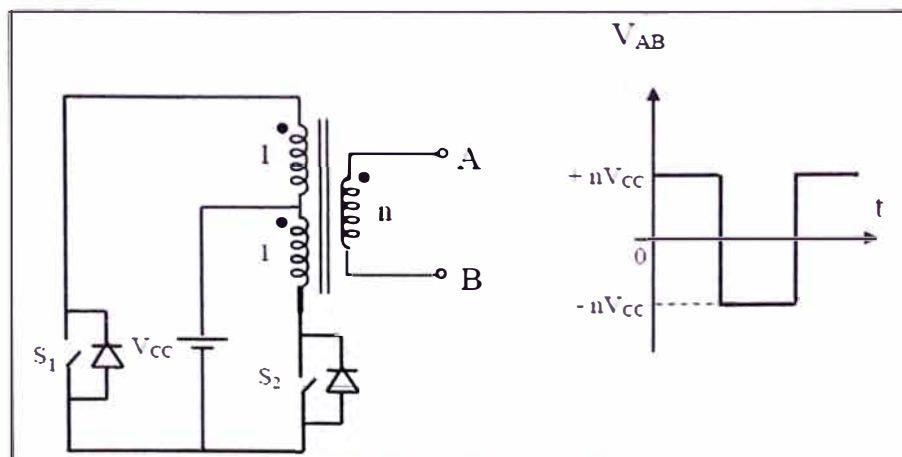


Fig.2.10 Inversor con transformador de toma media o push-pull

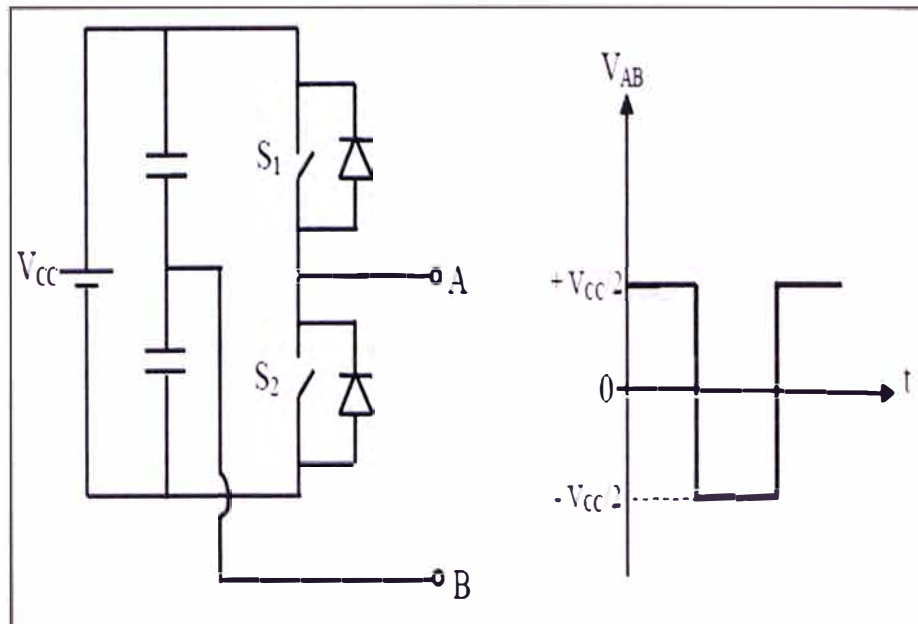


Fig.2.11 Inversor en medio puente

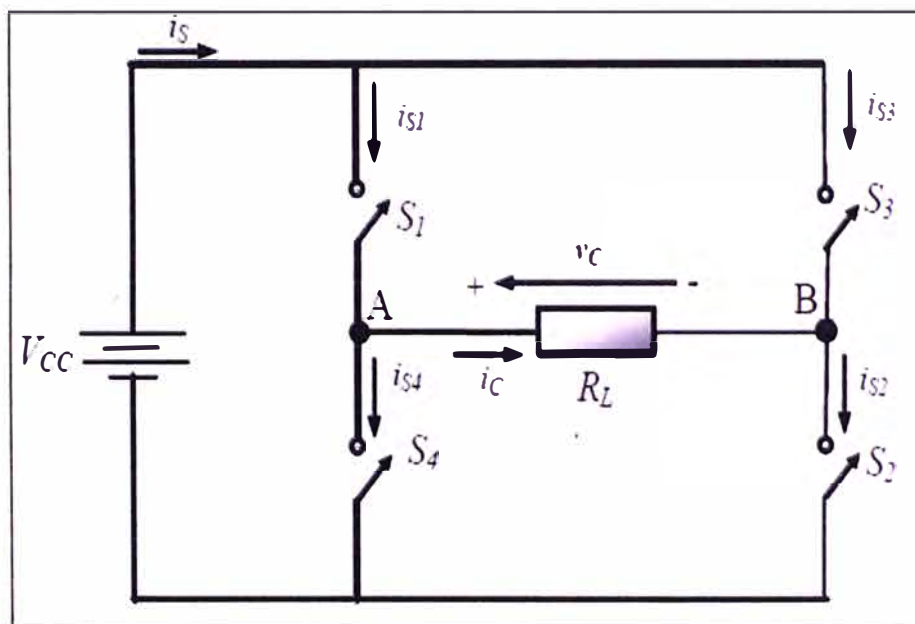


Fig.2.12 Inversor en puente completo

2.6.2 Inversor de modulación ancho de pulso PWM

La modulación de anchura de pulsos PWM mejora el contenido de armónicos en la salida de un inversor, que consiste en comparar una tensión senoidal (llamada de control) de baja frecuencia (imagen de la tensión de salida buscada) con una señal triangular simétrica de alta frecuencia y cuya frecuencia determine la frecuencia de conmutación. La frecuencia de la onda triangular (llamada portadora) debe ser mínimo 20 veces la máxima frecuencia de la onda senoidal, y así conseguir una reproducción aceptable de la forma de onda sobre una carga, después del filtraje. La señal resultante de la comparación nos generará la lógica para abrir y cerrar los semiconductores de potencia.

La figura 2.13 muestra la modulación de una onda senoidal, produciendo una tensión con 2 niveles y cuya frecuencia es la de la onda triangular [8]:

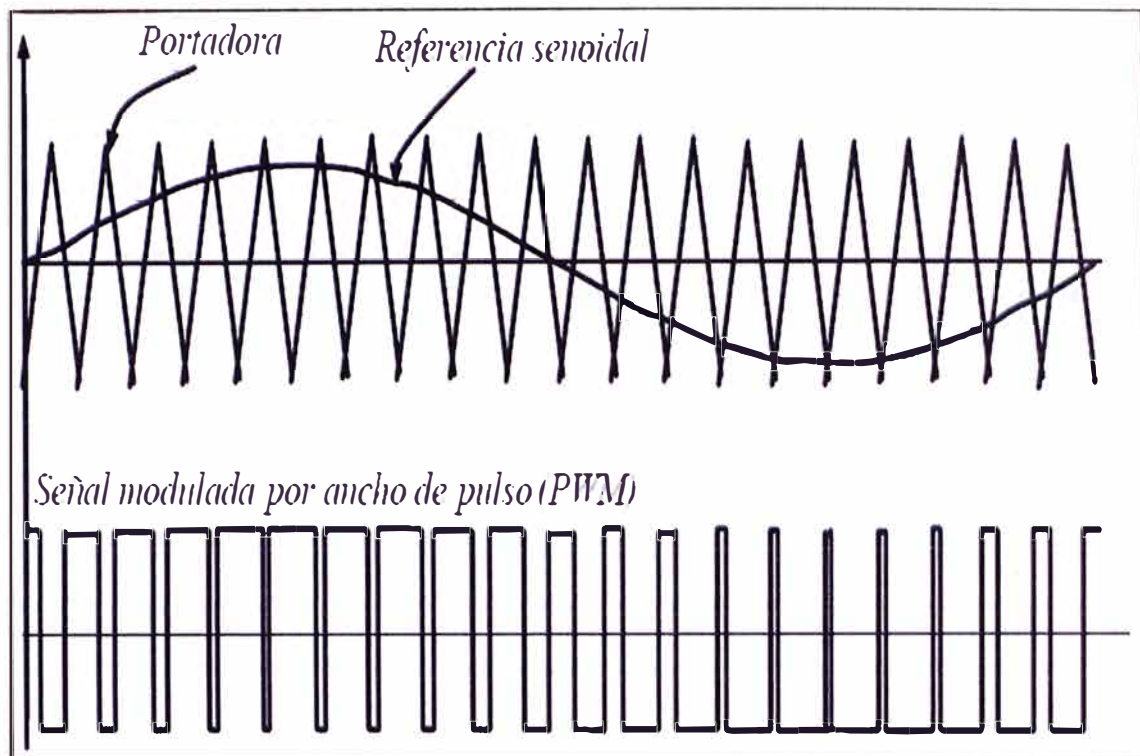


Fig.2.13 Generación de una señal PWM

A partir de la señal PWM se generan los pulsos de apertura y cierre de los interruptores. Por ejemplo según la figura 2.12, si la señal PWM tiene un valor alto se cierran los interruptores S_1 y S_2 , caso contrario se cierran los interruptores S_3 y S_4 , y así la tensión de salida aplicada a la carga, está formada por una serie de ondas rectangulares de amplitud igual a la tensión de alimentación y de periodo variable.

Cabe anotar que el contenido de armónicos de la tensión de salida se desplaza a las frecuencias elevadas siendo más fáciles de filtrar y por lo tanto, un filtro pasa bajos con frecuencia de corte por encima de la frecuencia de referencia es perfectamente capaz de producir una atenuación efectiva en componentes en la frecuencia de los kHz.

a) Inversores Trifásicos con control PWM

Para el análisis de los inversores trifásicos se puede utilizar la configuración de la figura 2.14, compuesta por una rama simple por fase. La tensión de salida de cada rama (por ejemplo la tensión AN), depende de la tensión de entrada y del estado de los interruptores. La tensión resultante es totalmente independiente de la corriente de salida, dado que existirá un interruptor en estado encendido en cada rama. Para el análisis se considerará que todos los componentes son ideales, y las conmutaciones de los interruptores se producen de forma instantánea, sin ningún tiempo muerto [9].

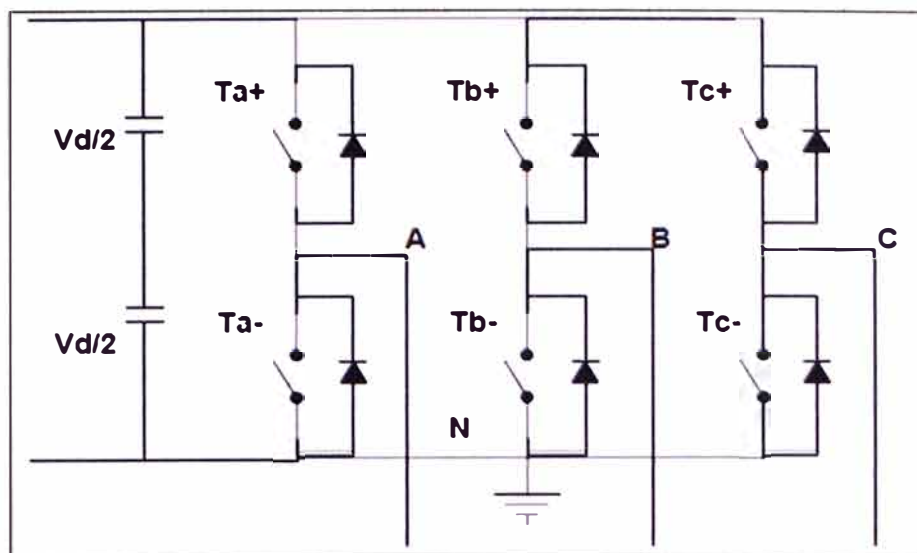


Fig.2.14 Inversor trifásico con tres ramas

Para la modulación se buscan tres tensiones senoidales controlables en magnitud y frecuencia, a partir de una fuente de tensión continua de entrada. Para obtener una tensión trifásica completamente equilibrada, los interruptores deberán comparar la misma onda triangular de amplitud y frecuencia constante múltiplo de la frecuencia de la onda de tensión fundamental que se desea sintetizar, con tres ondas senoidales de la misma frecuencia (tres ondas moduladoras), de amplitud y frecuencia variable y desfasadas entre sí 120° , tal como se muestra en la siguiente figura 2.15:

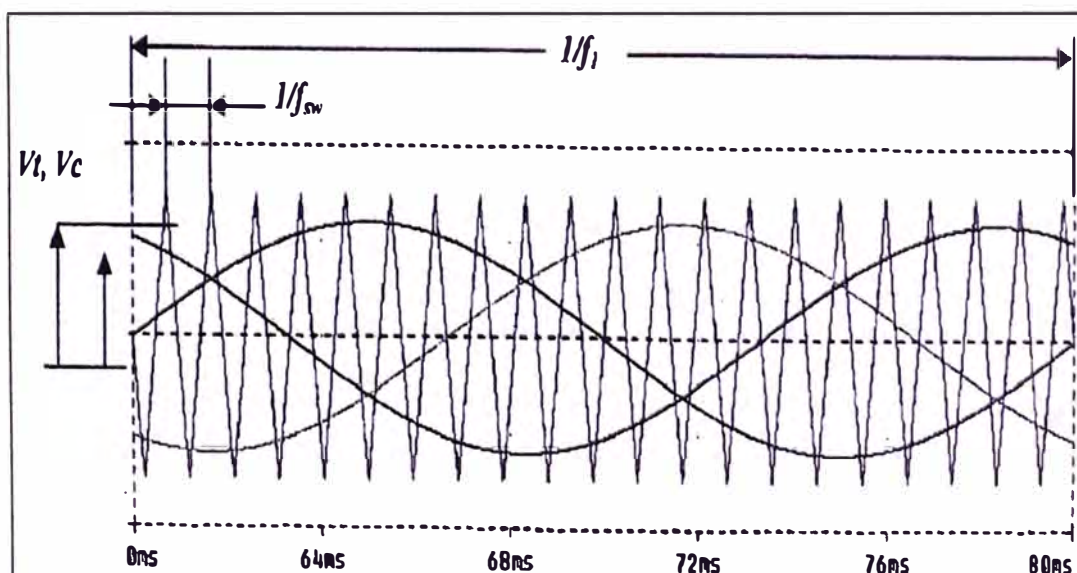


Fig.2.15 Formas de onda para inversores trifásicos con control PWM

Así se tiene que cada onda sinusoidal de control, es comparada con la onda triangular a través de un circuito de comparación electrónico, de tal forma que cada onda senoidal genere en las intersecciones con la onda triangular, las conmutaciones para las llaves de potencia o IGBT's, en cada fase, según la gráfica 2.16:

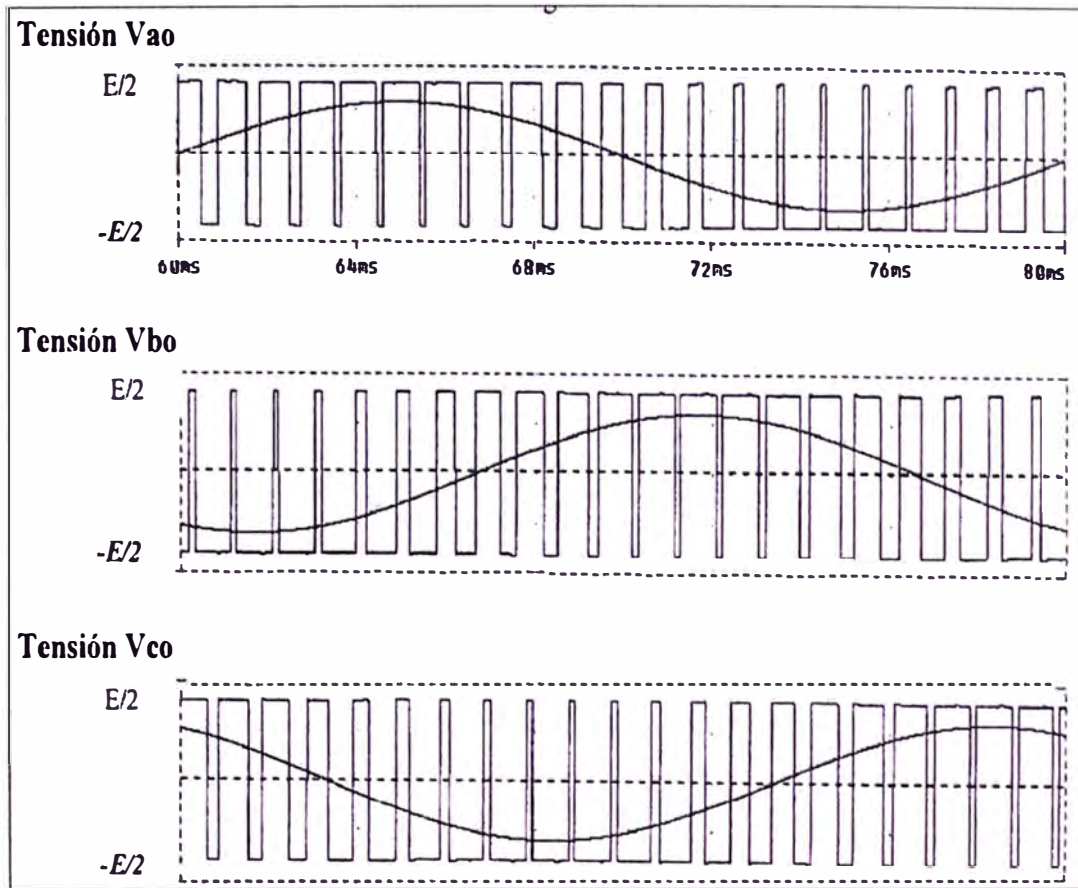


Fig.2.16 Tensiones por fase del inversor PWM

En la región lineal de la modulación, la amplitud de la componente fundamental de la tensión de salida varía proporcionalmente con m_a . Entonces la amplitud o valor pico de la componente fundamental de la tensión en una de las fases de salida del inversor, será [10]:

$$V_{a01m\acute{a}x} = m_a * \left(\frac{V_{dc}}{2} \right) \quad (2.31)$$

De donde el valor eficaz de la tensión de línea será:

$$V_{LL,1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} * (V_{a01m\acute{a}x}) \quad (2.32)$$

Tenemos finalmente:

$$V_{LL,1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} * m_a * \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.33)$$

Donde V_{dc} es el voltaje nominal de la fuente de tensión y m_a es el índice de modulación o relación entre la amplitud (valor máximo o pico) de la tensión de control sinusoidal ($V_{c_{m\acute{a}x}}$) y la amplitud de la onda triangular ($V_{t_{m\acute{a}x}}$):

$$m_a = \frac{V_{c_{m\acute{a}x}}}{V_{t_{m\acute{a}x}}}; 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2.34)$$

2.7 Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos NTCS DS 020-97-EM

El objetivo de la norma es establecer los niveles mínimos de calidad de los servicios eléctricos, las obligaciones de las empresas de electricidad y los clientes que operan bajo el régimen de la Ley de Concesiones Eléctricas, Decreto Ley N° 25844. Establece los aspectos, parámetros e indicadores sobre los que se evalúa la Calidad del Servicio de la Electricidad, las obligaciones de las empresas de electricidad y las de los clientes [11].

2.7.1 Calidad del Producto para la tensión y frecuencia

Se evalúa por las transgresiones en los puntos de entrega de las tolerancias en los niveles de: Tensión, Frecuencia y Perturbaciones (flicker y tensiones armónicas).

a) Calidad del Producto - Tensión

La calidad del producto de la tensión, está definida por los siguientes indicadores:

- Indicador de calidad: El indicador de calidad para evaluar la tensión de entrega, en un intervalo de medición (k), de quince minutos de duración, es la diferencia (ΔV_k) entre la media de los valores eficaces (RMS) instantáneos medidos en el punto de entrega (V_k) y el valor de la tensión Nominal (V_N) del mismo punto. Este indicador está expresado como un porcentaje de la tensión nominal del punto de medición:

$$\Delta V_k (\%) = (V_k - V_n) / V_n * 100\% \quad (2.35)$$

- Tolerancias: $\pm 5.0\%$ de la tensión nominal y $\pm 7.5\%$ en BT Urbano-Rural y/o Rurales,
- Energía de mala calidad: Si la tensión se encuentra fuera de la tolerancia por un tiempo superior al 5 % del periodo de medición.

b) Calidad del Producto - Frecuencia

La calidad del producto de la frecuencia, está definida por los siguientes indicadores:

- Indicador de calidad: El indicador principal para evaluar la frecuencia de entrega, en un intervalo de medición (k) de quince (15) minutos de duración, es la diferencia (Δf_k) entre la media (f_k) de los valores instantáneos de la frecuencia, medidos en un punto cualquiera de la red de corriente alterna no aislado del punto de entrega en cuestión, y el valor de la Frecuencia Nominal (f_n) del sistema.

Este indicador, denominado Variaciones Sostenidas de frecuencia, está expresado como un porcentaje de la Frecuencia Nominal del sistema.

$$\Delta f_k (\%) = (f_k - f_n) / f_n * 100\% \quad (2.36)$$

Adicionalmente se controlan los siguientes indicadores:

- Variaciones Súbitas de Frecuencia (VSF) por intervalos de un minuto;

* Integral de Variaciones Diarias de Frecuencia (IVDF)

- Tolerancias: Las tolerancias sobre la frecuencia nominal, son:

* Variaciones sostenidas (Δf_k (%)) $\pm 0.6\%$.

* Variaciones Súbitas (VSF') ± 1.0 Hz

* Variaciones Diarias (IVDF') ± 600 ciclos.

CAPÍTULO III

IMPLICANCIAS EN LA OPERACIÓN DE GENERADORES DE INDUCCIÓN

Un sistema conformado por una máquina de inducción o motor operado a la inversa como generador trifásico, entregará potencia cuando se le proporciona excitación suficiente y su rotor sea girado a una velocidad mayor que la del campo magnético del estator, como resultado de la acción mecánica de una fuerza motriz en su flecha mediante una bomba centrífuga operada como turbina de bajo caudal y caída de agua, la cual a su vez será movida por un flujo hidráulico en sentido inverso.

El problema de utilizar el sistema arriba descrito, es el de regular manualmente las válvulas de ingreso a la bomba operada como turbina, y la necesidad de una regulación de tensión y frecuencia. Se presentan a continuación las implicancias de utilizar un generador de inducción para suministrar potencia en una red aislada:

3.1 Ventajas en el empleo de generadores asíncronos

El empleo de generadores asíncronos en una planta minihidroeléctrica, presenta un gran conjunto de ventajas técnicas y económicas, siendo las principales:

- Robustos

- De construcción simple

- Niveles bajos de corriente de corto-circuito

- Capacidad de autoprotección.

- Requiere poco mantenimiento.

- Alta relación potencia-peso (W/kg).

- Habilidad de generar potencia incluso cuando es impulsado a velocidad variable (dentro del rango de la variación del deslizamiento)

- Costo relativamente bajo.

- Gran disponibilidad en el mercado.

3.2 Principales inconvenientes en el empleo de generadores asíncronos

A pesar de todas las ventajas que implicaría utilizar un generador de inducción descritas líneas arriba, su aplicación y desempeño presentan los principales inconvenientes:

3.2.1 Características de regulación de tensión y de frecuencia insatisfactorias

Se hace necesario el empleo de equipos de control, tales como un regulador de velocidad para la turbina y/o un regulador de tensión para el generador, y cuyos costos debido a su complejidad son relativamente altos, aumentando así la inversión en la implementación de este tipo de sistemas.

3.2.2 Requerimiento de una compensación de potencia reactiva externa

Se necesita de una fuente de potencia reactiva externa para mantener la excitación en la máquina. En el presente sistema propuesto el generador de inducción es acoplado a un banco de condensadores, ya que necesita potencia reactiva durante toda su operación para poder auto-excitarse y con ello obtener tensión en sus terminales de salida. Por lo tanto, se debe tener en cuenta el correcto dimensionamiento del banco de condensadores a utilizar, ya que mientras mayor sea la potencia entregada por el generador, mayor será la potencia reactiva requerida por éste y con ello mayor será el tamaño del banco de condensadores a utilizar.

3.3 Evaluación y análisis de los inconvenientes encontrados

Con los inconvenientes encontrados en el empleo de generadores asíncronos y ante la necesidad de regular las variaciones de la tensión y la frecuencia, nos lleva a buscar alternativas de control de las variables del generador y de compensación de potencia reactiva, mediante una solución económica, eficaz y simple de implementar en una minicentral hidroeléctrica.

Con ello, se pretende lograr que nuestro sistema de generación no sólo brinde energía eléctrica según una demanda establecida, sino también entregue un suministro de calidad, utilizando para ello un sistema que cumpla estas condiciones de regulación de tensión y frecuencia, estableciéndolos dentro de los rangos admitidos por la norma técnica de calidad de los servicios eléctricos NTCS DS 020-97-EM.

3.4 Objetivo del informe

El objetivo del presente informe es el de comprobar técnicamente mediante simulaciones, la viabilidad de utilizar en una planta minihidroeléctrica, una bomba a la inversa y un motor de inducción como generador, al cual se le ha implementado un sistema de control sencillo y efectivo para poder regular la tensión y la frecuencia, logrando con ello disminuir la complejidad en la implementación de este tipo de máquinas utilizadas en los sistemas de generación hidráulica convencionales y aislados del sistema interconectado.

3.5 Síntesis del informe

El sistema de control propuesto es el control de tensión con carga DC, el cual consiste en la aplicación en una planta minihidroeléctrica de un motor de inducción trifásico operando como generador autoexcitado por un banco de condensadores, conectado en sus terminales a un inversor trifásico bidireccional de modulación de ancho de pulso tipo fuente de tensión (VS-PWM).

Bajo la condición que el generador es impulsado por una bomba operada como turbina de eje no regulado (la cual es representada por una máquina prima en la simulación en Matlab), la regulación de la tensión se llevará a cabo mediante la conexión y desconexión de una carga resistiva acoplada a los terminales DC del inversor PWM y en paralelo a un condensador DC.

La conexión del sistema de generación trifásico (generador de inducción más condensadores de excitación) con el inversor trifásico, es hecho a través de reactores, y sincronizados mediante un circuito PLL.

Asimismo, el banco de condensadores y los reactores formarán un filtro pasabajos.

3.6 Limitaciones y exclusiones del presente informe

Las limitaciones y exclusiones del presente informe son las siguientes:

Se encuentra excluido del presente informe, la realización de pruebas experimentales de laboratorio. Para la verificación de los resultados de simulación, se utilizarán resultados de ensayos realizados por investigadores de otros países, en los anexos del informe.

Se usó una aproximación para la característica de saturación del generador de inducción.

Debido a que la fuente hidráulica es variable, se utilizará un motor primo que simule el torque mecánico proporcionado por la turbina y en el cual sólo operará bajo cierto rangos de caudal hidráulico y por ende de potencia entregada por el generador de inducción. En la simulación, el generador opera dentro de un rango de velocidades de 0 a 196rad/s que corresponden a valores de deslizamiento de 0 a -3.98% y que significan una variación de potencia activa de 0 a 2254W.

La carga máxima del sistema está proyectada a 1200W de potencia activa.

CAPÍTULO IV SISTEMA DE GENERACIÓN ORIGINAL

4.1 Sistema de generación original sin control

El sistema original comprende un generador de inducción accionado en su flecha mediante una bomba centrífuga la cual a su vez sería movida por un flujo hidráulico en sentido inverso, es decir un flujo aplicado en la “descarga” de la bomba y desfogado a través de la “succión”. De esta forma el fluido entregará su potencia al impulsor de la bomba y este a su vez transmitirá potencia mecánica a la flecha del generador de inducción al que se encuentra acoplado. Es decir la bomba estará operando como una turbina hidráulica [12].

La figura siguiente muestra el esquema que utilizamos en nuestras pruebas, una tubería de agua existente nos proporcionó el potencial hidráulico.

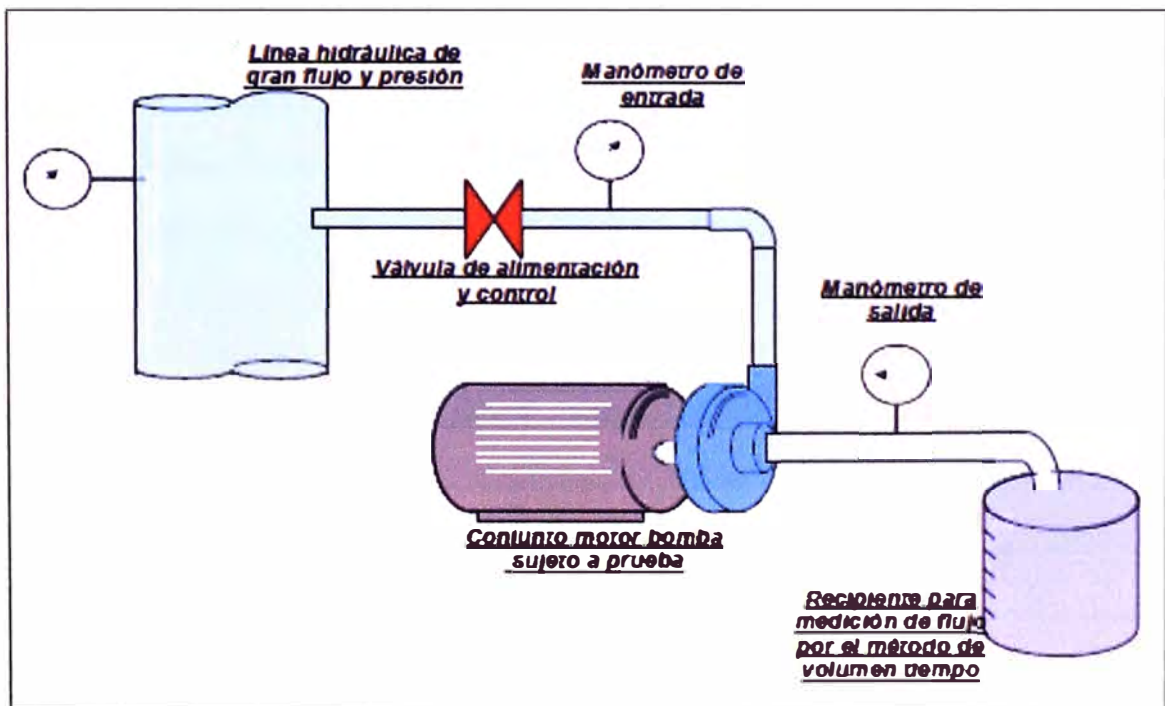


Fig.4.1 Empleo de bomba hidráulica como turbina

Nuestro motor jaula de ardilla funcionará como generador de inducción bajo dos esquemas, uno de estos es arrancando como motor conectado a la red eléctrica para posteriormente, auxiliado por la bomba en operación inversa, aumentar su velocidad y

convertirse en generador entregando potencia a la red eléctrica. El segundo esquema es el de mover la flecha del motor de inducción utilizando únicamente la potencia mecánica que entrega la bomba en sentido inverso y mediante el uso de un banco de capacitores, lograr que el motor se convierta en generador.

Un claro ejemplo de este tipo de sistemas, es el sistema prototipo presentado en el anexo B, al final del presente informe.

4.1.1 Procedimiento de operación en una red aislada del sistema interconectado

Considerando el siguiente esquema:

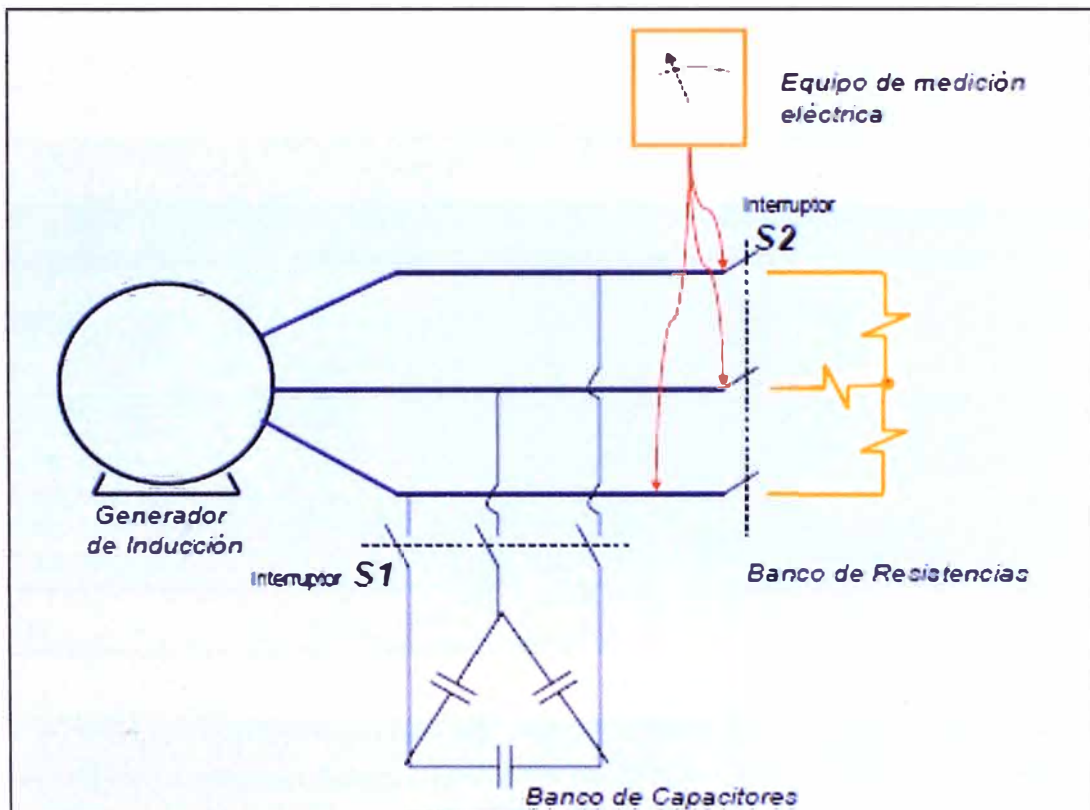


Fig.4.2 Esquema del generador sin conexión a la red

El procedimiento de operación del sistema de generación en una red aislada, será:

- Mediante la regulación de las válvulas dispuestas en la succión y descarga de la máquina hidráulica, llevaremos al conjunto hasta una velocidad tal que la flecha de la máquina eléctrica gire a velocidad síncrona.
- Logrado lo anterior se mide voltaje en las terminales del generador de inducción. En este momento debe encontrarse un pequeño voltaje, debido al magnetismo remanente presente en la máquina eléctrica.
- Luego se procede a cerrar el interruptor que conecta a un banco de capacitores, el banco de capacitores debe proporcionar la potencia reactiva que la máquina de inducción toma en vacío cuando opera como motor. De ser necesario se regula el

flujo de manera tal de conservar la velocidad síncrona en flecha. En este momento el voltaje y frecuencia en las terminales del motor deben ser similares a los de la placa del motor, dependiendo de la conexión elegida en la caja de terminales.

d) Logrado lo anterior se cierra el interruptor que conecta un banco de cargas. En este momento deberemos regular el flujo hidráulico de tal forma que conservemos la velocidad síncrona en la flecha del generador. Se monitorea la potencia entregada por el generador de inducción a la carga eléctrica.

e) En cada una de las etapas se registran lecturas de velocidad en flecha del motor, presiones de succión y descarga, flujo y parámetros eléctricos.

4.1.2 Eficiencia de la bomba operada como turbina

El principal problema del equipo de bombeo en operación inversa, es no lograr acelerar la flecha del generador por arriba de la velocidad síncrona. El principal problema a resolver cuando seleccionamos una bomba para ser utilizada como turbina es la falta de información al respecto. Si bien, los distribuidores cuentan con las curvas de operación de sus equipos de bombeo, ignoran por completo el comportamiento al operar en forma inversa.

Las siguientes son formulas utilizadas para obtener una estimación de la carga y flujo que requiere un equipo de bombeo para llegar al punto de máxima eficiencia en su operación como turbina [12]:

$$Q_t = \frac{Q_{bep}}{(\eta_{\max})^{0.8}} \times \frac{N_t}{N_p}; \quad (4.1)$$

$$H_t = \frac{H_{bep}}{(\eta_{\max})^{1.2}} \times \left(\frac{N_t}{N_p} \right)^2; \quad (4.2)$$

Donde:

- Q_{bep} es el flujo a máxima eficiencia de la máquina en el modo de bomba
- H_{bep} es la carga a máxima eficiencia de la máquina en el modo de bomba
- η_{\max} es la máxima eficiencia de la máquina en el modo de bomba
- Q_t es el flujo a máxima eficiencia de la máquina en el modo de turbina
- H_t es la carga a máxima eficiencia de la máquina en el modo de turbina
- N_t es la velocidad de la flecha de la máquina en el modo turbina
- N_p es la velocidad de la máquina en el modo de bomba.

La energía transferida entre un fluido y un impulsor está principalmente determinada por la posición y forma de sus alabes, es decir por los ángulos que conforman éstos. Cuando se está operando en el modo turbina, la transferencia de energía al rotor está determinada por la forma de la cámara espiral o voluta de la bomba, por lo tanto diferentes detalles de diseños y fabricación afectarán la operación de esta máquina, dos máquinas pueden tener similar operación en el modo bomba pero no necesariamente alcanzarán las mismas condiciones operando en el modo turbina.

4.1.3 Descripción de los elementos del sistema de generación original

El siguiente esquema muestra al sistema de generación original:

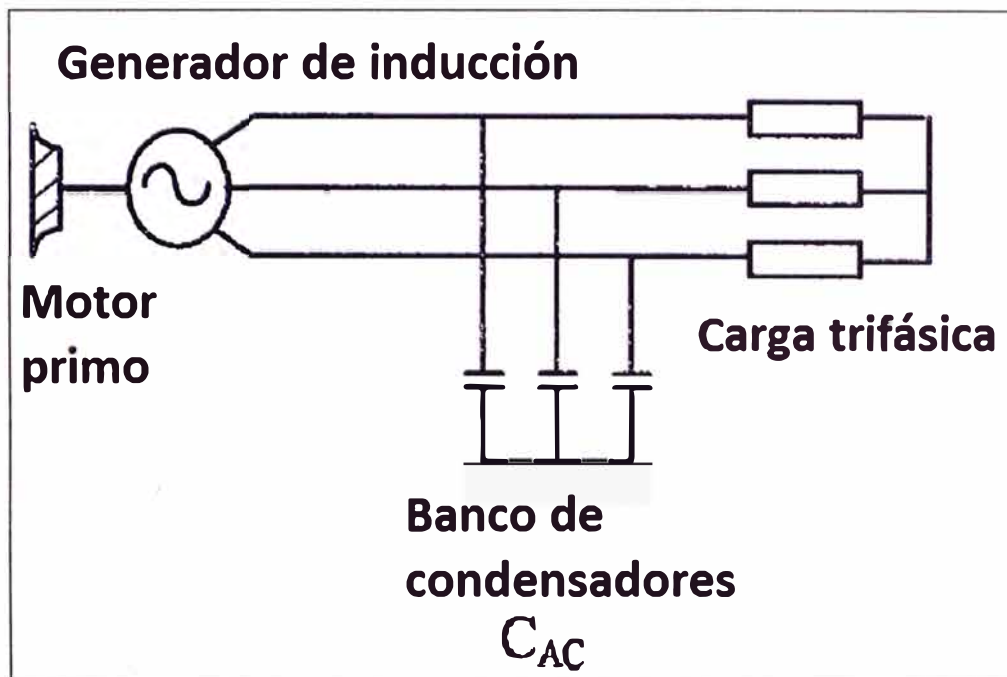


Fig.4.3 Esquema representativo del sistema de generación original

A continuación se procede a describir cada elemento del sistema de generación original, con las mismas características que serán utilizadas en las simulaciones del capítulo VI:

a) Bomba hidráulica operada como turbina

La bomba hidráulica será del tipo centrífuga de flujo radial, la cual será utilizada a la inversa como turbina de eje no regulado.

Tabla N° 4.1 Características de la bomba hidráulica [12]

Características	Valores
Tipo	flujo radial
Succión / Descarga	3''/2.5''
Impulsor	cerrado con diámetro máximo de 7-1/16''
Eficiencia máxima	65% (según fabricante)

b) Motor primo DC

Es empleado en la simulación como la fuente que proporcionará el torque mecánico necesario para hacer girar al rotor del generador, reemplazando a la turbina hidráulica.

Esta máquina prima posee las siguientes características:

Tabla N° 4.2 Características del motor primo DC [13]

Características	Valores
Potencia nominal	100HP
Tensión nominal	500V
Velocidad nominal	1750 rpm
Tensión de campo magnético	300V
Resistencia de la armadura (r_a)	0.1968 Ω
Inductancia de la armadura (L_a)	0.003442 H
Resistencia de campo (r_f)	58.82 Ω
Inductancia de campo (L_f)	7.267 H
Inductancia mutua (L_{a-f})	0.5003 H

c) Generador de inducción

La máquina asíncrona será utilizada como un generador de inducción de 3hp, el cual será utilizado en una minicentral hidroeléctrica aislada del sistema interconectado (SEIN). Posee las siguientes características:

Tabla N° 4.3 Datos técnicos del generador de inducción empleado [13]

Característica	Valor
Tipo	Asíncrono jaula de ardilla
Potencia nominal (P_g)	3hp ó 2238 W
Número de fases	Trifásico
Tensión de bornes (V_g)	220 V
Frecuencia (f)	60 Hz
Número de Polos (p)	4
Velocidad síncrona (η_s ó ω_s)	1800 rpm ó 188.5 rad/s
Eficiencia a plena carga	81.5% (según fabricante)

- Curva de magnetización del generador

La curva de magnetización, también conocida como la curva de excitación o

saturación, está relacionada directamente con las características del generador de inducción, las cuales determinan la tensión de salida para una determinada corriente de magnetización a través de los bobinados. En las simulaciones del capítulo VI del presente informe, se ha incluido un generador de inducción con la curva de saturación conformada por los siguientes valores:

Tabla N° 4.4 Datos técnicos del generador de inducción empleado [13]

Corriente (A)	Tensión (V)
0.9249	40
1.6672	60
3.0377	80
5.3988	125
7.5000	170
9.2824	200
10.1337	210
12.5000	240
15.5532	260
21.2421	285
30.1917	310

La gráfica tensión vs corriente es la curva de magnetización mencionada será:

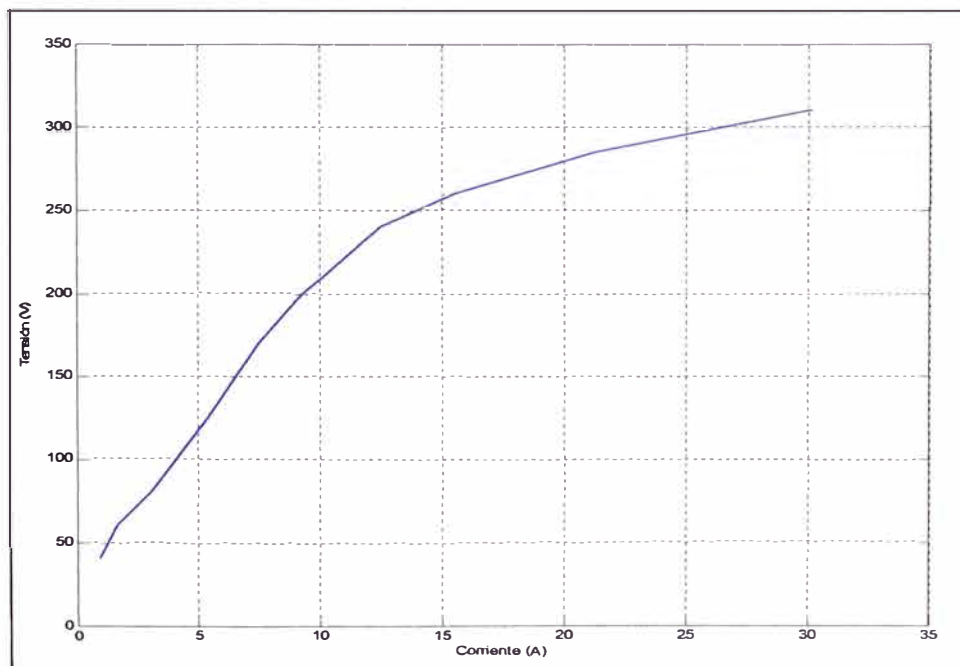


Fig.4.4 Curva de saturación del generador de inducción de 3hp

- Característica Torque-deslizamiento y modelamiento del generador de inducción

La característica torque-deslizamiento es la curva que representa el torque aplicado en el eje del rotor, versus la velocidad angular del rotor o versus el deslizamiento (diferencia de la velocidad síncrona y la velocidad rotórica sobre la velocidad síncrona). La generación de potencia activa se producirá cuando la velocidad del rotor supere al valor de la velocidad del campo magnético o velocidad síncrona de 1800rpm o 188.5 rad/s:

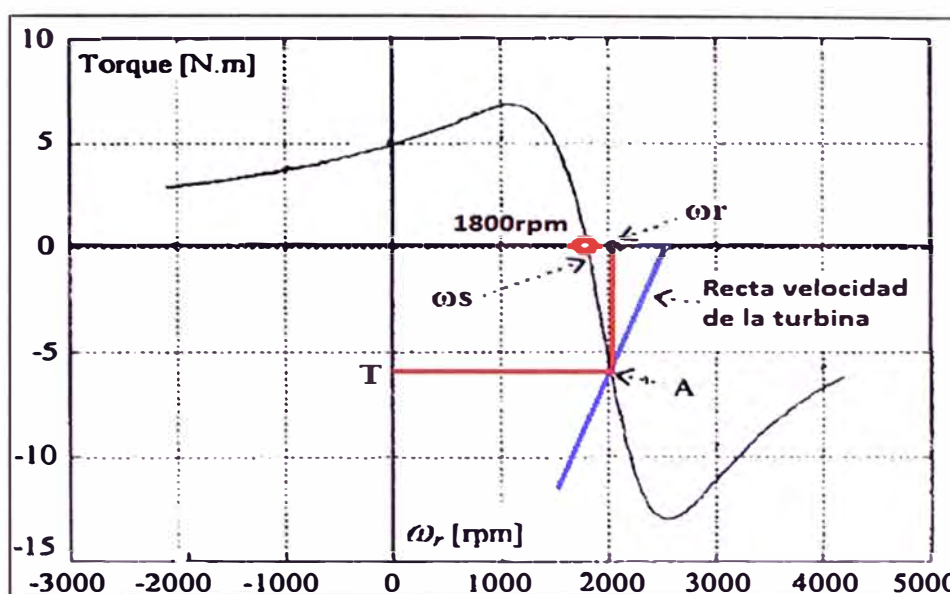


Fig.4.5 Curva Torque vs velocidad del rotor

Para poder graficar la curva torque-deslizamiento propia del presente sistema, es necesario realizar el modelamiento de la máquina síncrona definiendo de sus parámetros intrínsecos a la frecuencia de 60Hz. Los parámetros en mención son:

Tabla N° 4.5 Parámetros intrínsecos del generador de inducción empleado [13]

Parámetros	Valores
Frecuencia (f)	60 Hz
Reactancia	$X = \omega * L = (2\pi f) * L$
Resistencia del estator (r_1)	0.435 Ω
Inductancia del estator (L_1)	0.004 H
Reactancia del estator (X_1)	1.508 Ω
Resistencia del rotor referida al estator (r'_2)	0.816 Ω
Inductancia del rotor referida al estator (L'_2)	0.002 H
Reactancia del rotor referida al estator (X'_2)	0.754 Ω
Inductancia mutua (L_m)	0.069 H
Reactancia mutua (X_m)	26.13 Ω

Con los parámetros arriba definidos, el modelamiento de la máquina asíncrona será representado por el siguiente circuito equivalente referido al estator:

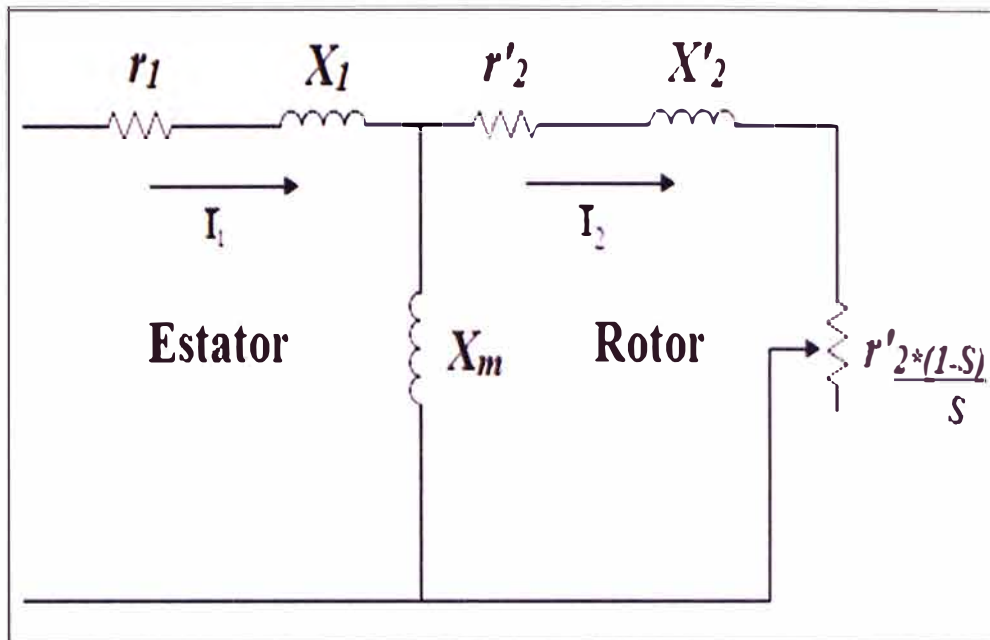


Fig.4.6 Circuito equivalente del generador asíncrono referido al estator

d) Banco de condensadores trifásico

El banco de condensadores C_{AC} será acoplado a los bornes de salida del generador a fin de proporcionarle los reactivos necesarios para su autoexcitación. En el presente informe, el banco de capacitores posee las siguientes características y dimensiones:

Tabla N° 4.6 Características del banco de condensadores AC [13]

Característica	Valor
Valor por fase (C_{AC})	270 μ F
Tensión	900V

e) Carga trifásica AC

La carga eléctrica trifásica (R_L) en nuestro sistema, será un banco de resistencias AC:

Tabla N° 4.7 Características de la carga trifásica AC [13]

Característica	Valor
Valor de la resistencia por fase (RL)	35 Ω
Potencia trifásica	2000W

CAPÍTULO V SISTEMA DE CONTROL DE TENSIÓN Y FRECUENCIA PROPUESTO

Cómo fue explicado, los motores de inducción usados como generadores, poseen importantes ventajas que lo hacen muy competitivo en el mercado de generadores para plantas minihidroeléctricas, pero para ello se necesitaría implementar un nuevo sistema con el cual se pueda controlar su principal desventaja; la regulación de la tensión y frecuencia entregadas.

5.1 Sistema de Control propuesto

El sistema de control propuesto comprende un generador de inducción excitado por un banco de condensadores trifásicos (C_{AC}), y un inversor bidireccional tipo fuente de tensión de modulación de ancho de pulso (VS-PWM). El generador es conectado al lado AC del inversor a través de filtros de inductancias (L_f), y un capacitor (C_{DC}) es empleado como fuente de tensión en el lado DC del inversor, según el siguiente gráfico:

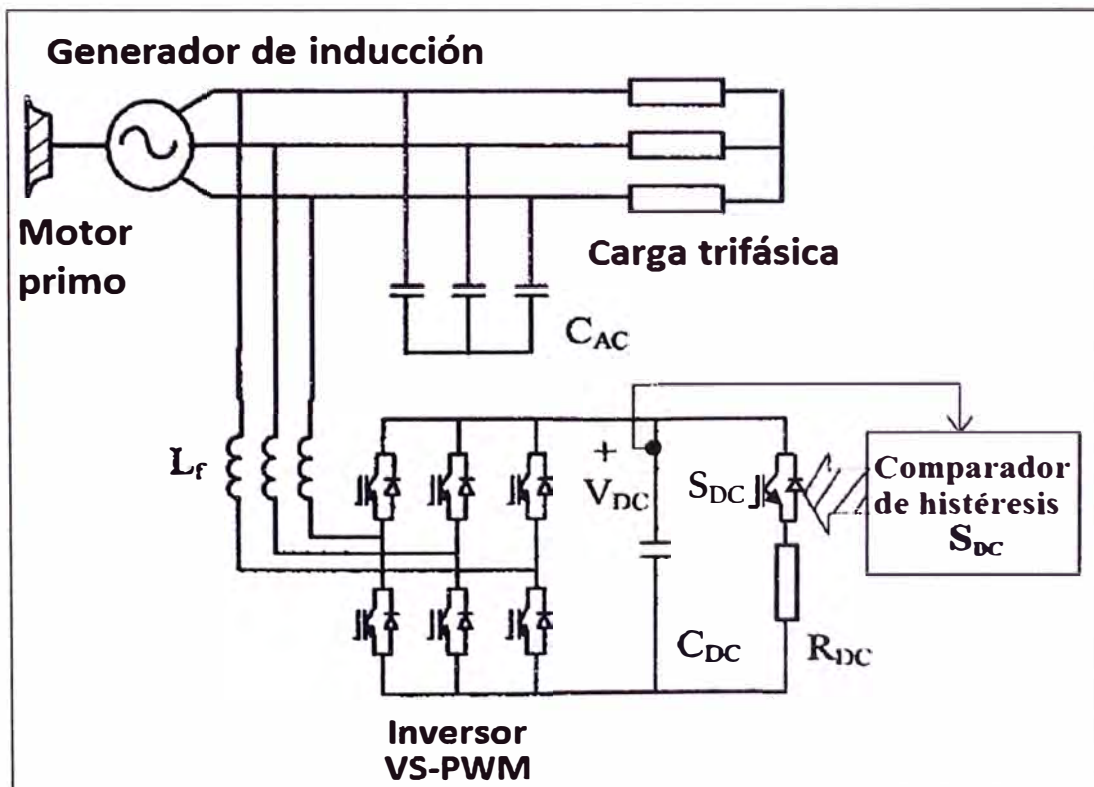


Fig.5.1 Esquema representativo del sistema de control propuesto

5.1.1 Principio de funcionamiento del sistema de control propuesto

La frecuencia fundamental de la tensión de salida del inversor VS-PWM se mantiene constante a 60Hz y como resultado una frecuencia constante se crea en los bornes del generador de inducción, y por lo tanto, el generador opera de acuerdo a la característica torque - velocidad a 60Hz, según lo mostrado en la siguiente figura [14]:

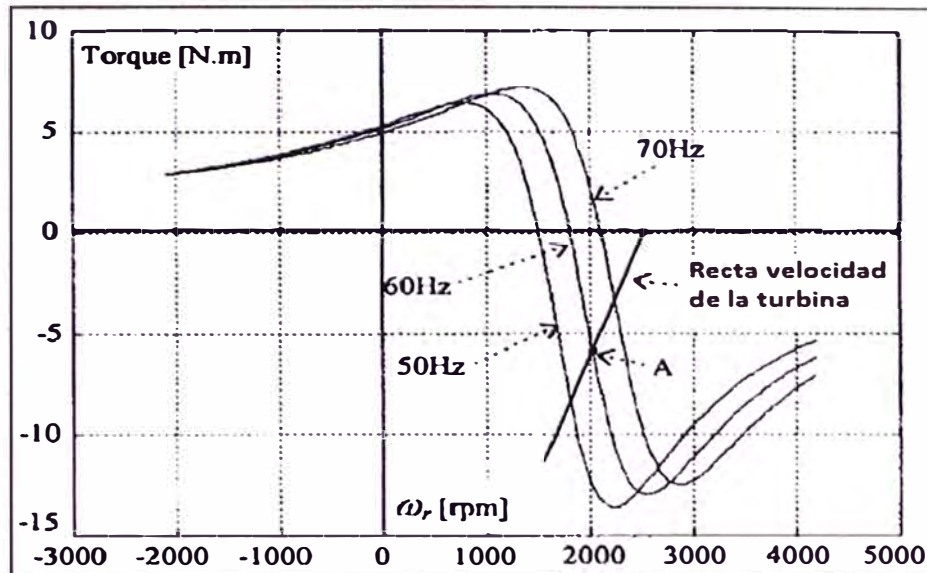


Fig.5.2 Curva Torque vs velocidad del rotor para una máquina de inducción

Se considera que el generador de inducción es impulsado por una turbina hidráulica sin gobernador de velocidad mecánico, transmitiéndose así una velocidad variable al rotor.

La potencia eléctrica generada es determinada por la potencia mecánica de la turbina, y por la asociación de las características torque-velocidad para el generador de inducción y para la turbina hidráulica, siempre y cuando la frecuencia fundamental se mantenga constante a la salida del inversor.

Debido a que la frecuencia eléctrica del estator será 60Hz, la curva torque-velocidad correspondiente es la curva central para 60Hz de la figura 5.2, y la potencia eléctrica generada es determinada por la multiplicación del torque mecánico y la velocidad en el eje del rotor (según la curva del torque del motor primo).

Considerando que el uso de gobernadores de velocidad incrementa significativamente el costo del sistema de generación, la velocidad del eje será no regulable; así, la potencia generada es establecida por el punto común perteneciente a las características de torque de la turbina y generador (punto "A" en la Fig.5.2).

La cantidad de potencia eléctrica producida por el generador de inducción es por lo tanto completamente independiente de la potencia de la carga AC. Así, la potencia eléctrica producida tiene que ser completamente consumida para mantener el balance entre la

potencia generada y la consumida. En caso la carga AC no sea suficiente para consumir la potencia generada, la supuesta potencia en exceso será almacenada en el condensador DC, produciendo un incremento en su tensión V_{DC} .

Debido a que C_{DC} actúa como fuente de tensión para el inversor VS-PWM, el valor de la tensión AC del inversor será constante si V_{DC} y el índice de modulación m_i no varían. Como resultado, una buena regulación de tensión es obtenida en los bornes del generador si se mantiene V_{DC} invariable, ya que la única diferencia entre las tensiones del generador y la de los terminales del inversor, es la pequeña caída de tensión que existe en el filtro de las inductancias L_f . Por lo tanto, la potencia de exceso tiene que ser consumida para lograr una buena regulación de tensión en el generador.

La potencia en exceso puede ser consumida por una carga controlable situada en el lado DC del inversor VS-PWM que está conectado a los terminales del generador. Esta alternativa es llamada “control con carga DC” de la tensión V_{DC} , en donde V_{DC} es la señal de retroalimentación que describe el balance entre la potencia generada y la consumida. Un incremento en V_{DC} indica que la potencia eléctrica generada es mayor que la potencia de la carga conectada al generador de inducción. Contrariamente, un decremento en V_{DC} indica un déficit en la potencia del generador.

La muestra V_{DC} es comparada con un valor de referencia, produciendo una señal de error usada para definir la cantidad de potencia consumida por la carga controlable DC.

El arranque del sistema es llevado a cabo a través del proceso de autoexcitación del generador de inducción. La autoexcitación es el resultado de la interacción entre la tensión proporcionada por el flujo magnético residual de la máquina de inducción y el banco capacitores trifásico AC de excitación.

Después del arranque, el generador proporciona la energía para cargar el condensador DC y cubrir las pérdidas activas durante la operación en estado estable. El condensador también suministrará la energía requerida por el circuito de control del VS-PWM.

El filtro pasabajo de segundo orden que está compuesto por el banco de condensadores DC y la inductancia L_f , garantizan una forma de onda sinusoidal en los bornes del generador de inducción. El dimensionamiento del banco de condensadores AC está basado exclusivamente en los requerimientos de autoexcitación del generador.

En el sistema aquí propuesto, el generador de inducción es el dispositivo responsable de convertir la potencia mecánica de la turbina en potencia eléctrica. Asimismo, el inversor VS-PWM es responsable de otras tres importantes funciones: fijar una frecuencia constante en el generador de inducción, proporcionar un mecanismo de regulación de tensión al sistema, y compensar la potencia reactiva requerida por el generador de inducción y las cargas AC si las requiriera.

Considerando que el condensador C_{DC} es la fuente de tensión del convertidor, que su tensión V_{DC} se mantiene constante, y que el convertidor permite flujo de potencia activa bidireccional; la tensión en los terminales del generador será regulada, incluso cuando alimente cargas altamente inductivas, tales como los motores de inducción.

Cabe resaltar que aunque el banco de capacitores C_{AC} puede ser retirado después del arranque del sistema sin afectar la magnetización del generador, esto no se hace, teniendo en cuenta la necesidad de un filtro $L_f C_{AC}$. Además, el banco de condensadores C_{AC} disminuye la demanda de potencia reactiva del convertidor VS-PWM.

Para el dimensionamiento de la potencia nominal del inversor VS-PWM, se debe tomar en cuenta la máxima potencia activa que pasará a través del inversor, así como la cantidad de potencia reactiva a ser compensada por el convertidor.

La ausencia de reguladores de velocidad junto con la simplicidad del sistema de control, son las características fundamentales que hacen al sistema económicamente atractivo.

El bajo costo, la robustez y la calidad satisfactoria de la energía, son las principales ventajas de este sistema con generador de inducción empleándose cargas disipativas para el control de la tensión V_{DC} , con el objetivo de mantener las características ventajosas del sistema.

a) Control de la tensión con carga DC

Este método de control consiste en utilizar cargas controlables continuas conectadas al lado DC del inversor VS-PWM, para consumir el exceso de potencia. Las cargas DC pueden ser empleadas en aplicaciones tales como la cogeneración, carga de baterías, calefacción, o en una asociación de estas opciones.

El sistema mostrado en la Fig.5.3 emplea una carga DC para propósitos de calefacción, en ese sentido, la carga controlable DC comprende una resistencia R_{DC} conmutada por un switch S_{DC} . El control de la tensión V_{DC} , se logra mediante su comparación con un valor

de referencia o consigna, usando para ello un comparador de histéresis que actuará sobre el IGBT o llave de potencia S_{DC} (Fig.5.3). Los límites de la histéresis deberán de ser escogidos para mantener V_{DC} en un rango de variación permisible (ventana), con la finalidad de evitar la variación de tensión (efecto flicker) en el lado AC.

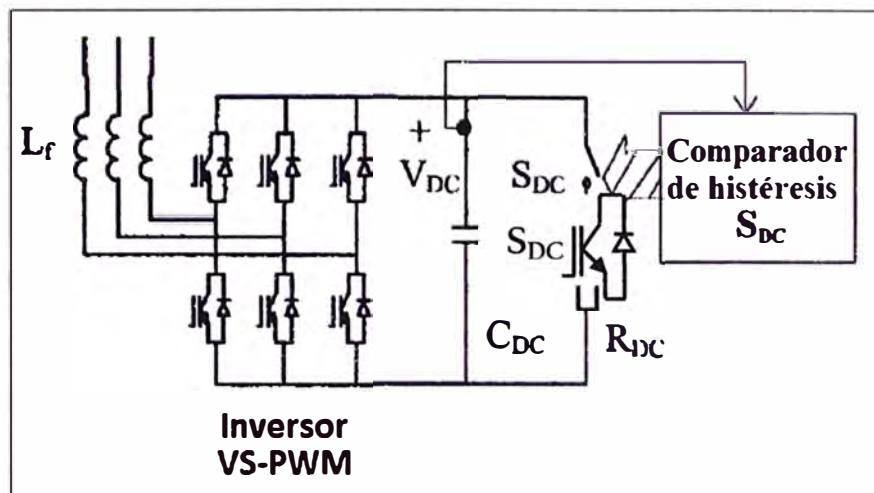


Fig.5.3 Esquema del sistema de control con carga DC

5.1.2 Descripción de los elementos del sistema de control propuesto

A continuación se procede a describir cada elemento del sistema de control propuesto, con las mismas características que serán utilizadas en las simulaciones:

a) Inversor bidireccional modulación ancho de pulso - fuente de tensión (VS-PWM)

El inversor PWM, cuyo lado AC será acoplado a los bornes del generador y cuyo lado DC será acoplado al condensador C_{DC} , está conformado principalmente por un conjunto de llaves electrónicas de potencia denominadas IGBT's, diodos en antiparalelo con cada llave, todos cumpliendo la función principal de controlar el circuito PWM. Asimismo, el inversor es importante en el sistema de control propuesto, dado que al conectarse en paralelo con el condensador C_{DC} se convertirá en una fuente de tensión independiente capaz de regular el flujo de potencia respecto al sistema, para lo cual se podrá modular la amplitud de la onda cuadrada generada en sus terminales, a través del índice de modulación (m_a).

Tabla N° 5.1 Características del Inversor PWM [15]

Característica	Valor
Tensión AC/DC (V)	220/400
Potencia	3kW
Índice de modulación (m_a)	0.8799
Frecuencia de conmutación (ft)	5kHz

b) Condensador C_{DC}

El condensador será acoplado al lado DC del inversor PWM. Luego de llevar al generador a la autoexcitación, se procederá a cargar al condensador C_{DC} hasta su valor de tensión pico de 311V ($220\sqrt{2}$) al funcionar como un rectificador de la tensión del generador. Por otro lado, el condensador C_{DC} es un elemento muy importante para el sistema de regulación de tensión, debido a que el comportamiento de la tensión del generador se verá reflejado en el comportamiento del condensador DC; siendo así que al verificar que la tensión V_{DC} se encuentra estable dentro de cierto rango, sabremos que la tensión del generador estará controlada:

Tabla N° 5.2 Características del condensador DC [15]

Característica	Valor
Valor (C_{DC})	2400 μ F
Tensión (V)	900V

c) Resistencia DC (R_{DC})

Con la finalidad de consumir la potencia activa en exceso del sistema, ya sea disipándola en forma de energía calorífica, y con ello conseguir equilibrar nuestro sistema en base a un equilibrio de las potencias, es necesario acoplar una resistencia DC (R_{DC}) en paralelo con el condensador C_{DC} .

Tabla N° 5.3 Características de la resistencia DC [15]

Característica	Valor
Valor de la resistencia (R_{DC})	51 Ω
Potencia máxima (P)	2000W

d) Inductancia (L_f)

La inductancia L_f junto con el banco de condensadores AC, forman un filtro pasabajo que logrará una tensión sinusoidal sin distorsión armónica.

Por otro lado, esta inductancia provocará una pequeña caída de tensión, debido a la diferencia entre la tensión del generador y la tensión del inversor PWM.

En el presente informe, la inductancia L_f presenta una pequeña resistencia en serie, y

posee las siguientes características y dimensiones:

Tabla N° 5.4 Características de la inductancia [15]

Característica	Valor
Valor por fase (L_f)	5 mH
Valor de la R en serie	0.1 Ω

e) Sistema PLL

El sistema PLL es el dispositivo encargado de sincronizar las tensiones del generador con las tensiones del sistema del inversor PWM, para que puedan ser acoplados y en donde el PWM pueda funcionar como una fuente de tensión independiente, bajo las condiciones de igualdad de tensión, frecuencia y fase. El PLL será conectado inicialmente a los bornes de salida del generador, con la finalidad de capturar la fase de la onda sinusoidal de tensión, luego el sistema PLL fijará la frecuencia a un valor constante de 60Hz a entregar al inversor PWM.

f) Comparador de histéresis

Está conformado por un comparador y un relé de disparo que actuará sobre la llave IGBT, la cual conectará o desconectará la resistencia DC, a fin de equilibrar las potencias del sistema.

Con el comparador, la resistencia R_{DC} será conectada cada vez que la tensión del condensador V_{DC} supere el valor máximo establecido de 402.5V (400V+2.5V), y con ello se pueda consumir potencia activa en la resistencia R_{DC} y así bajar la tensión V_{DC} a su valor de consigna de 400V, y como consecuencia bajar la tensión V_{AC} en los bornes del generador a su valor nominal para estabilizarla.

Asimismo, la resistencia DC será desconectada cada vez que la tensión del condensador V_{DC} sea menor que el valor mínimo establecido de 397.5V (400V-2.5V), y con ello se deje de consumir potencia activa en la resistencia R_{DC} y así subir la tensión V_{DC} a su valor de consigna de 400V, y como consecuencia subir la tensión V_{AC} en los bornes del generador a su valor nominal para estabilizarla.

Ejemplos de implementación de estos tipos de plantas minihidráulicas instaladas en África, son presentadas en el anexo C, al final del presente informe.

5.2 Cálculos de los valores de los elementos del Sistema propuesto

Los elementos del sistema propuesto fueron calculados en base a las siguientes consideraciones:

5.2.1 Deslizamiento y potencia máxima de generación

La velocidad máxima a la cual girará el rotor será $\omega_r = 196 \text{ rad/s}$, y para una velocidad síncrona de $\omega_s = 188.5 \text{ rad/s}$ (a 60Hz o 1800rpm), se tendrá un deslizamiento de:

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \% = -3.98 \% \quad (5.1)$$

Con los parámetros del circuito equivalente ya definidos para el generador, se procede a graficar la curva Torque – velocidad utilizando el programa Matlab. Tal como se puede apreciar en la figura 5.4, el valor del torque correspondiente a la velocidad rotórica de 196rad/s es de 11.5N/m, con ello la potencia máxima del generador para estos valores sería la multiplicación del torque máximo con la velocidad rotórica:

$$P = T_{\text{máx}} * \omega_r = 2254W \quad (5.2)$$

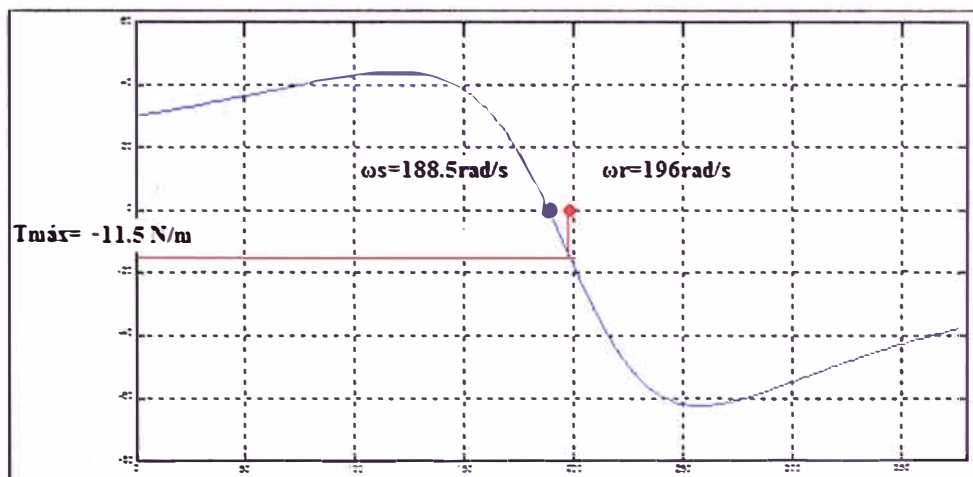


Fig.5.4 Curva Torque vs velocidad del rotor graficada en Matlab

5.2.2 Cálculo de la capacidad del banco de condensadores AC

La capacitancia está definida por la siguiente fórmula:

$$X_c = \frac{1}{\omega * C} \quad (5.3)$$

$$C = \frac{1}{2\pi * f * X_c} \quad (5.4)$$

Asimismo la reactancia capacitiva por fase, durante la saturación del generador es:

$$X_c = \frac{V_t / \sqrt{3}}{I_c} \quad (5.5)$$

Donde:

V_t : Tensión de saturación del generador, de valor en el informe 252.4V

I_c : Corriente de saturación del generador, de valor en el informe 14.74A

Reemplazando en la ecuación (5.5), tenemos la reactancia capacitiva:

$$X_c = \frac{252.4 / \sqrt{3}}{14.74} = 9.89 \Omega$$

Reemplazando el valor de X_c en (5.4) y para una frecuencia f de 60Hz, tenemos el valor de la capacitancia por fase:

$$C = \frac{1}{2\pi * 60 * 9.89} = 268.2 \approx 270 \mu F$$

5.2.3 Cálculo de la resistencia DC

Debido a que la resistencia DC, está directamente afectado por el lado DC del inversor PWM y del condensador DC, su comportamiento dependerá de estos elementos.

La tensión en los extremos de la resistencia, está definida por la relación siguiente:

$$V_{R_{DC}} = \delta * V_{m\acute{a}x} \quad (5.6)$$

$V_{R_{DC}}$: Tensión media en la resistencia.

δ : Ciclo útil de la resistencia, varía de 0 a 100%. Se escogió 80% (0.8).

$V_{m\acute{a}x}$: Tensión máxima en resistencia (tensión de referencia) de 400V.

Reemplazando en (5.6), tenemos:

$$V_{R_{DC}} = 0.8 * 400 = 320 V$$

Asimismo, el valor de la resistencia DC es:

$$R_{DC} = \frac{V_{R_{DC}}^2}{P_L} \quad (5.7)$$

Reemplazando $V_{R_{DC}}$ y asumiendo una potencia como máximo en la carga de 2000W, tenemos el siguiente valor para la resistencia DC:

$$R_{DC} = 320^2 / 2000 = 51.2 \approx 51 \Omega$$

* Nota: En el presente informe la carga máxima será de 1.23kW, pero se dará como seguridad el valor máximo de 2kW.

CAPÍTULO VI SIMULACIÓN DEL SISTEMA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra la simulación y análisis de resultados del sistema de control de tensión y frecuencia propuesto para el generador de inducción en una planta minihidroeléctrica aislada, así como su comparación con el sistema original de generación (sin regulación). Para las simulaciones se utilizó el programa Simulink de Matlab versión 7.10 del año 2010.

6.1 Esquema general utilizado

El siguiente esquema fue utilizado en la simulación:

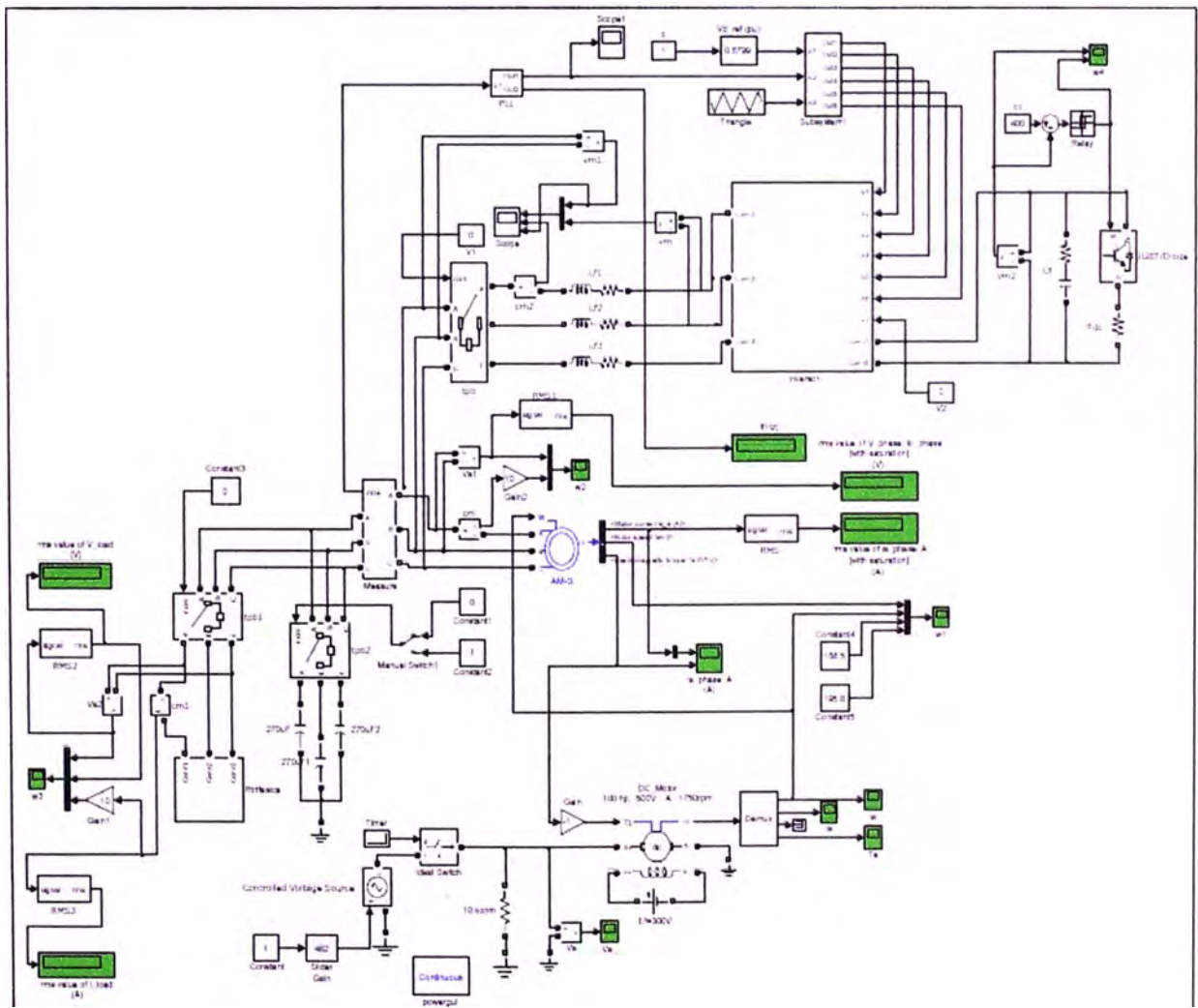


Fig.6.1 Esquema general utilizado en la simulación

6.2 Operación del sistema de generación original (sin inversor PWM)

A continuación se muestra la operación del sistema original de generación original en donde se encuentra desactivado el inversor PWM (en alta impedancia).

6.2.1 Gráficas de los resultados obtenidos en la simulación

a) Gráfica de la velocidad rotórica del generador

La velocidad rotórica del generador durante la simulación será el de la máquina prima acoplada a su eje, con el comportamiento de la gráfica 6.2:

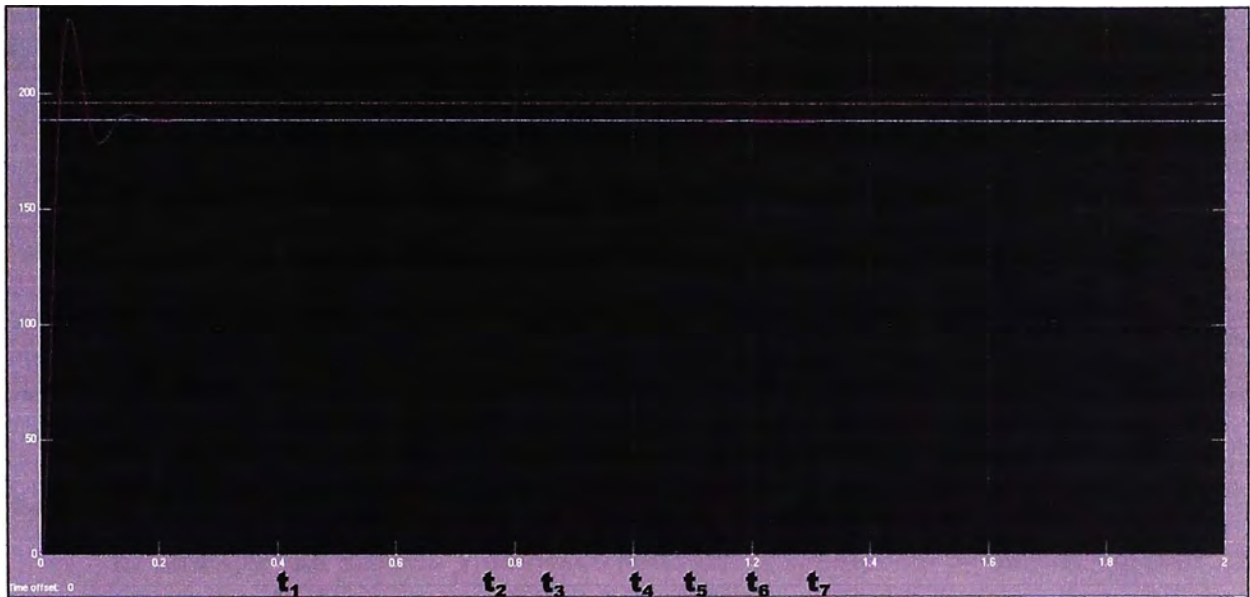


Fig.6.2 Velocidad rotórica del generador de inducción (sin inversor PWM)

b) Gráfica de la tensión y corriente del generador

La tensión de línea (gráfica amarilla) y la corriente (gráfica lila) del generador durante toda la simulación, presenta el siguiente comportamiento de la gráfica 6.3:

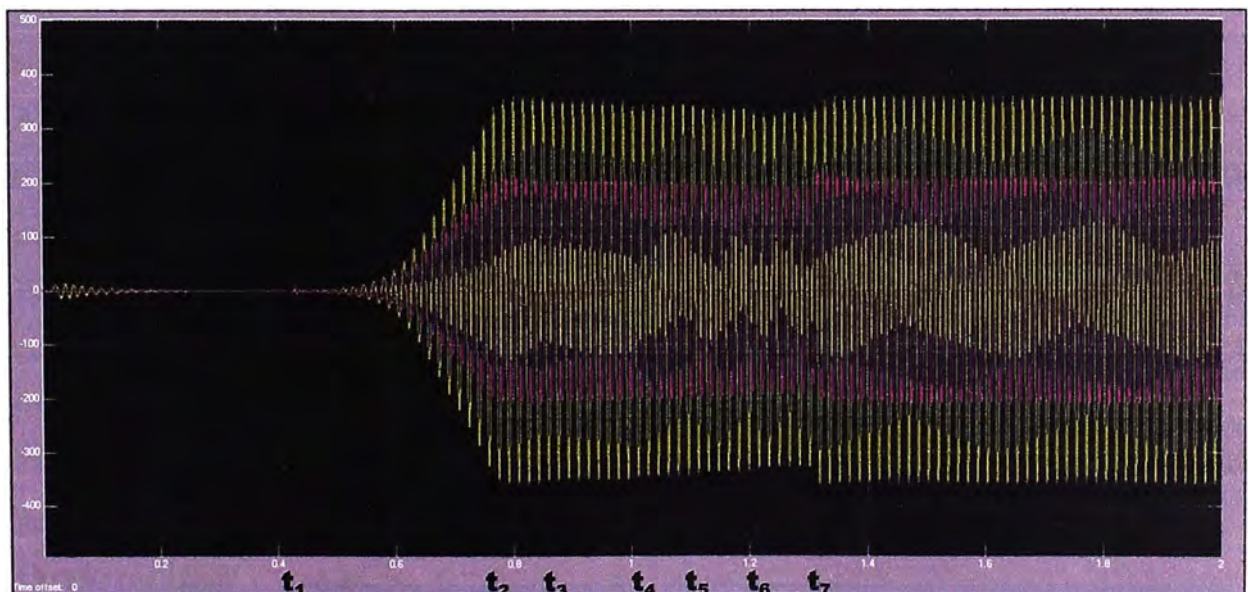


Fig.6.3 Tensión (amarillo) y corriente (lila) del generador de inducción (sin inversor)

c) Gráfica de la tensión y corriente en la carga resistiva

La tensión de línea (gráfica amarilla) y la corriente (gráfica lila) consumida por la carga trifásica resistiva en la simulación, poseen el comportamiento según la gráfica 6.4:

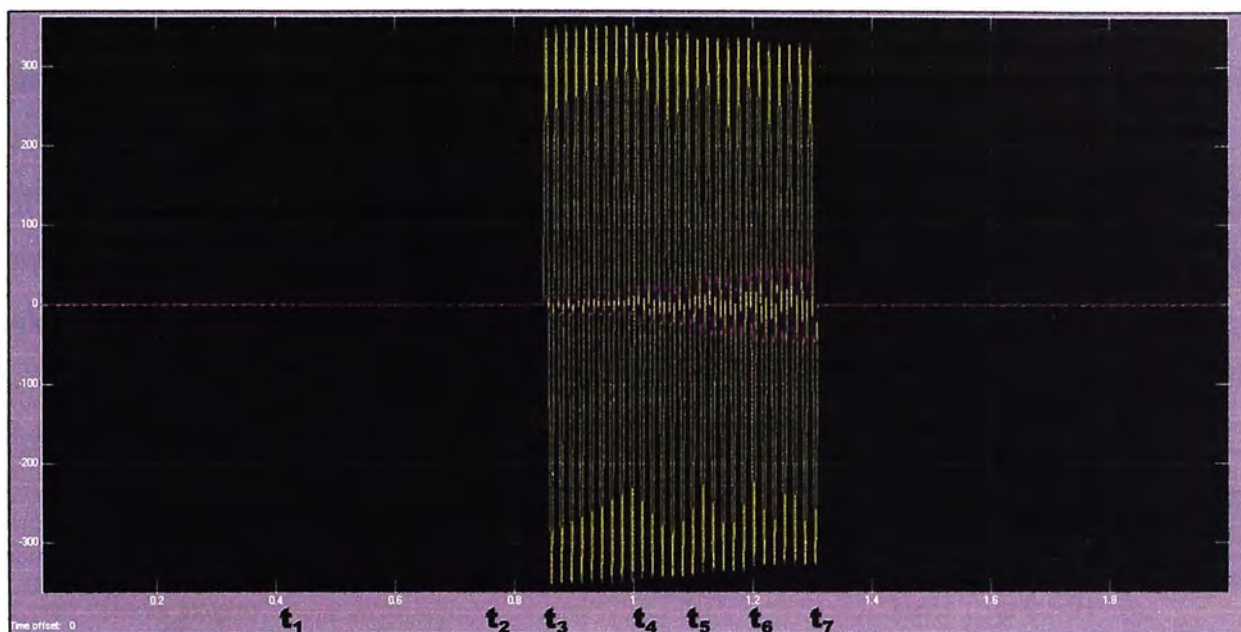


Fig.6.4 Tensión (en amarillo) y corriente (en lila) en la carga resistiva

6.2.2 Arranque y autoexcitación del generador

El arranque del sistema y autoexcitación del generador de inducción, consiste en llevar al generador de una operación transitoria a una operación estable.

En $t=0$ de la figura 6.2, se arranca el motor primo a fin de proporcionar la fuerza motriz necesaria para vencer la inercia del generador asíncrono. La tensión de excitación del motor primo será siempre constante de valor 300V y la tensión de armadura será de 482V. Para $t=t_1$ de la figura 6.2, la velocidad rotórica se ha estabilizado al valor de la velocidad síncrona de 188.5rad/s (recta turquesa).

Antes de $t=t_1$ en la figura 6.3, la tensión del generador es de un valor muy pequeño cercano a cero (tensión en amarillo y corriente en lila), debido a que la tensión es debida al magnetismo remanente del circuito del generador.

Para $t=t_1$ de la figura 6.3, se cerrará el switch que conecta el banco de condensadores AC con el generador, y así pueda darse la autoexcitación del generador de inducción y levantar tensión en sus terminales.

En $t=t_2$ de la figura 6.3, se ha producido la magnetización del generador y la tensión del generador llegará a 357Vpico (252.4Vrms) y la corriente a 20.85Apico (14.74Arms).

Con lo realizado líneas arriba, el generador de inducción ha sido autoexcitado, apareciendo tensiones en sus terminales estabilizadas a un valor cercano al de saturación.

6.2.3 Conexión, incremento gradual y desconexión de carga trifásica resistiva

Para el sistema original de generación en una red aislada y sin control de tensión y frecuencia, se deberá mantener en todo momento constante la velocidad síncrona de 188.5rad/s en el eje del rotor del generador. Esto debido a que para poder entregar potencia, la carga trifásica será la encargada de producir el deslizamiento de velocidades necesario.

El siguiente paso consiste en conectar la carga resistiva trifásica, aumentando progresivamente su valor mediante el ingreso de cuatro resistencias en paralelo (una por una), para una potencia consumida de 0 a 1.35kW:

Cabe aclarar que el valor de la corriente del generador y de la carga en las gráficas 6.3 y 6.4, han sido ampliadas en diez veces a fin de poder tener una mejor visualización.

En $t=t_3$ de la figura 6.4, se conecta la primera resistencia, teniendo como valor de resistencia equivalente a $R_{AC \text{ equivalente}}=160\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=0.39\text{kW}$, y con ello la tensión rms de la carga alcanza los 248.9V, y la corriente rms 0.9014A.

En $t=t_4$ de la figura 6.4, se conecta la segunda resistencia en paralelo, teniendo como valor de resistencia equivalente a $R_{AC \text{ equivalente}}=80\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=0.73\text{kW}$, y con ello la tensión rms de la carga alcanza los 242.9V, y la corriente rms de valor 1.739A.

En $t=t_5$ de la figura 6.4, se conecta la tercera resistencia en paralelo, teniendo como valor equivalente a $R_{AC \text{ equivalente}}=53.33\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=1.04\text{kW}$, y con ello la tensión rms de la carga alcanza los 234.8V, y la corriente rms de valor 2.552A.

En $t=t_6$ de la figura 6.4, se conecta la última resistencia en paralelo, teniendo como valor de resistencia equivalente a $R_{AC \text{ equivalente}}=40\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=1.35\text{kW}$, y con ello la tensión rms de la carga alcanza los 234.4V, y la corriente rms 3.327A.

El siguiente paso consiste en desconectar las cargas del sistema de generación (rechazo de carga), y para lo cual se deberá de retirar las cuatro resistencias trifásicas a la vez, pasando así de consumir una potencia de 1350W a 0W.

Con ello, en $t=t_7$ de la figura 6.4, se aprecia que la tensión y la corriente de la carga se reducen a cero debido a su desconexión y el valor de la tensión del generador aumenta súbitamente según se muestra en $t=t_7$ de la figura 6.3.

En conclusión, el sistema original de generación necesita una regulación de la tensión en la carga, debido a que sus valores están por encima de los valores nominales esperados, y como consecuencia pueden dañar a las cargas conectadas.

6.3 Operación del sistema de control de tensión y frecuencia propuesto

6.3.1 Gráficas de los resultados obtenidos en la simulación

a) Gráfica de la velocidad rotórica del generador

El comportamiento de la velocidad rotórica durante toda la simulación, el cual es el mismo que la velocidad de la máquina prima, es el de la figura 6.5:

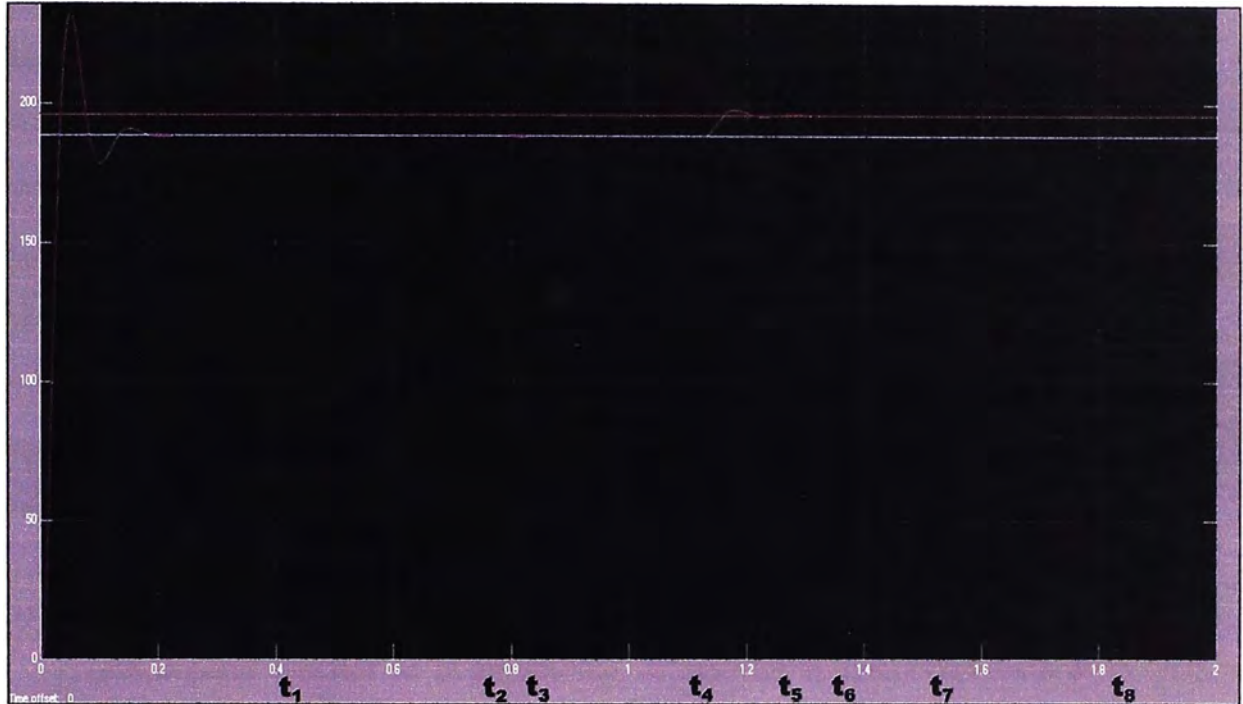


Fig.6.5 Velocidad rotórica del generador de inducción

b) Gráfica de la tensión y corriente del generador

La tensión de línea (gráfica amarilla) y la corriente (gráfica lila) del generador durante la simulación, poseen el siguiente comportamiento según la figura 6.6:

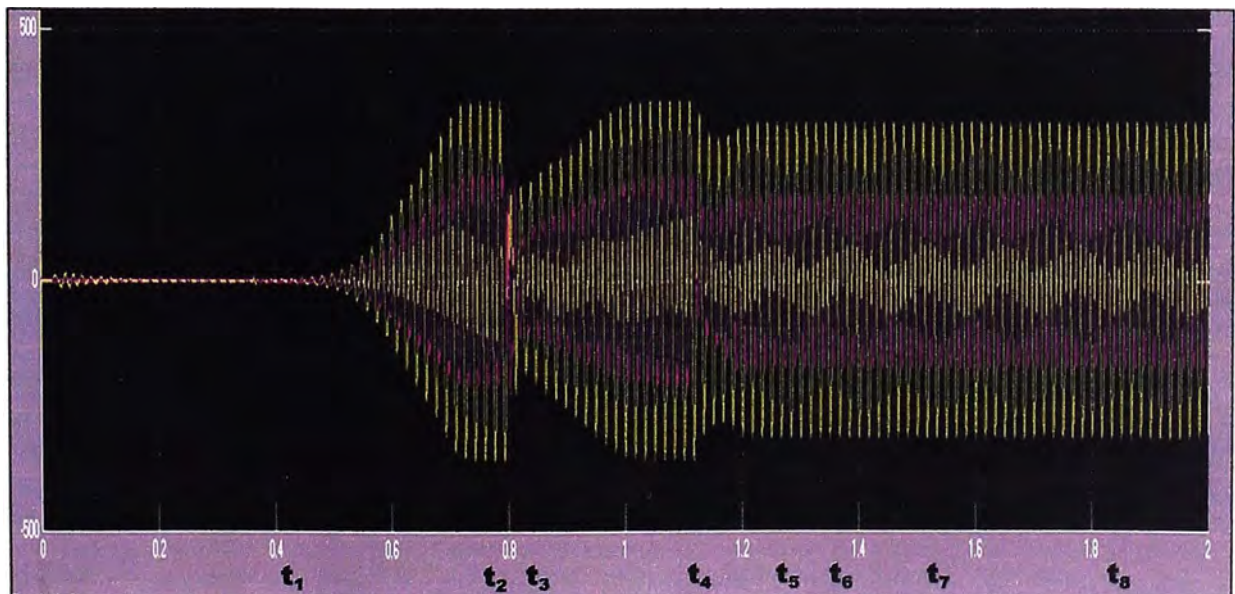


Fig.6.6 Tensión (amarillo) y corriente (lila) del generador de inducción (con inversor)

c) Gráfica de la tensión y corriente en la carga resistiva

La tensión de línea (gráfica amarilla) y la corriente (gráfica lila) consumida por la carga trifásica resistiva en la simulación, poseen el comportamiento de la gráfica 6.7:

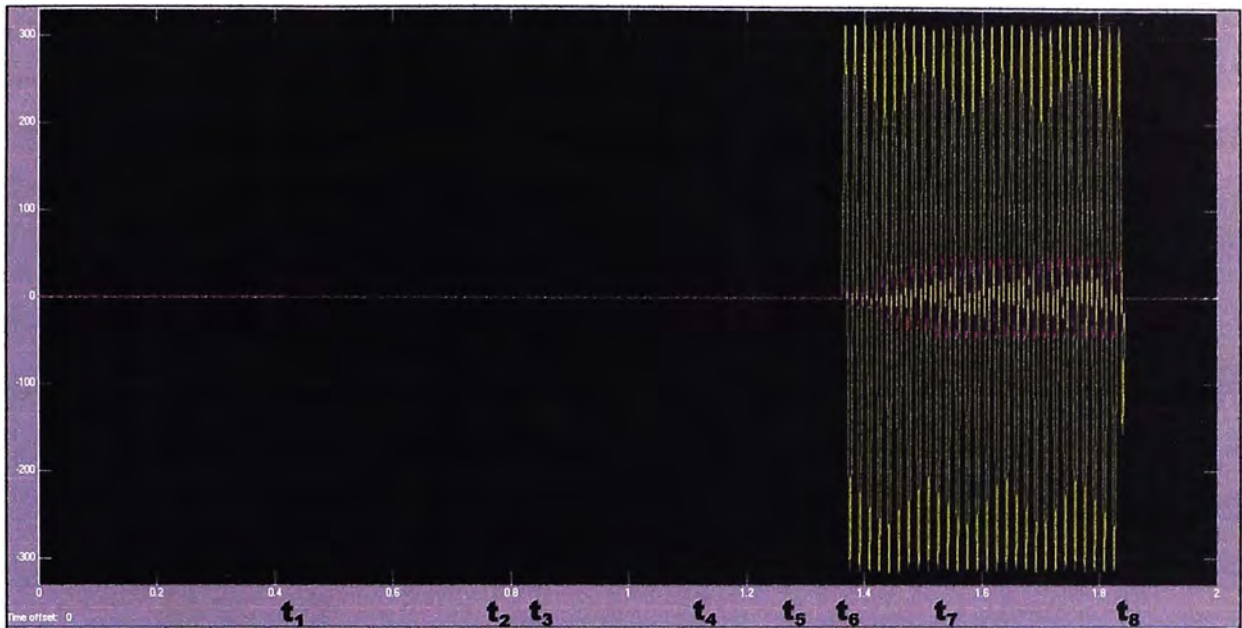


Fig.6.7 Tensión (en amarillo) y corriente (en lila) en la carga resistiva

d) Gráfica del condensador DC y disparos del comparador de histéresis

En la parte superior de la gráfica 6.8, se muestra el comportamiento de la tensión del condensador durante su proceso de carga. En la parte inferior se muestran los disparos realizados por el relé del comparador de histéresis, a fin de abrir y cerrar la carga DC conectada al inversor PWM:

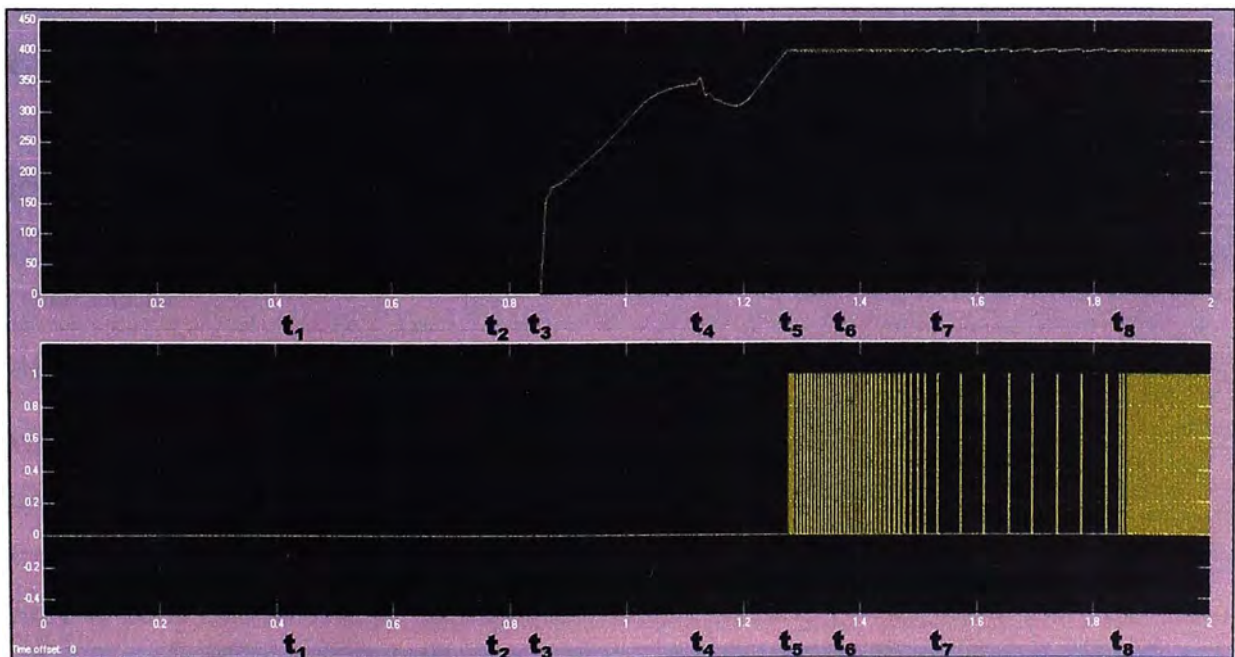


Fig.6.8 Tensión del C_{DC} (arriba) y disparos del comparador de histéresis (abajo)

e) Gráfica tensión AC del inversor, y corriente inversor-generador

En la parte superior de la gráfica 6.9, se muestra el comportamiento de la tensión de los terminales AC del inversor (en lila) el cual está superpuesto a la tensión en bornes del generador (en amarillo). En la parte inferior, se muestra la corriente entre los terminales del inversor PWM y los bornes del generador:

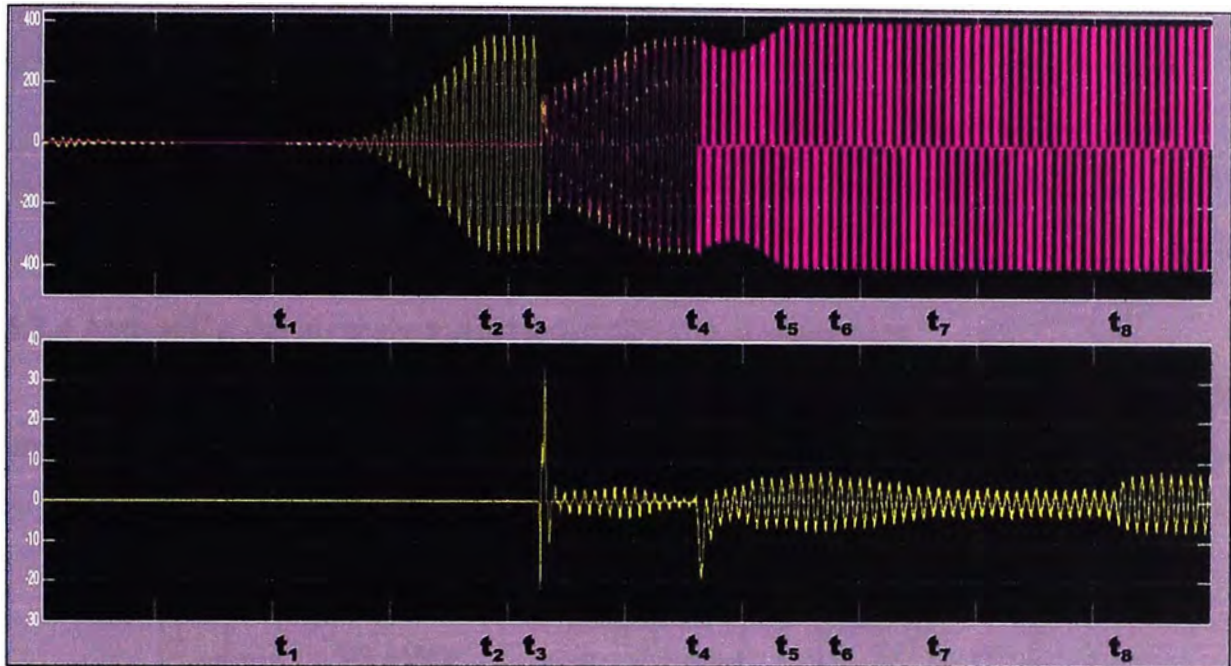


Fig.6.9 Tensión del inversor PWM (arriba), y corriente inversor-generador (abajo)

6.3.2 Arranque y autoexcitación del generador

Es el mismo procedimiento descrito para el sistema de generación original del acápite 6.2.2 subcapítulo 6.2, coincidiendo el tiempo $t=t_1$ y $t=t_2$ de la gráfica 6.3 con la 6.6.

6.3.3 Carga del condensador DC

En $t=t_3$ de la gráfica 6.8, se cierra el switch que conecta los terminales del generador con el inversor PWM cuyas llaves de potencia (IGBT's) están en alta impedancia, comportándose así el inversor como un rectificador, el cual cargará al condensador C_{DC} .

Se deberá esperar hasta que la tensión del generador cargue al condensador C_{DC} hasta el valor pico de la tensión nominal, es decir 311.12 V (que es $220\sqrt{2}$). Sin embargo en $t=t_3$ de la gráfica 6.6, se aprecia que la tensión del generador ha caído, produciéndose un transitorio debido al ingreso del condensador al sistema de generación.

En $t=t_4$ de la gráfica 6.8, el condensador ha sido cargado hasta 350V_{DC} pico. Asimismo para $t=t_4$ de la gráfica 6.6, se aprecia que la tensión del generador se ha recuperado hasta el valor de 252.4V y con un valor de corriente de 14.79A.

En la siguiente figura 6.10, se aprecia un detalle del comportamiento de carga del condensador DC, en donde llega a su valor máximo:

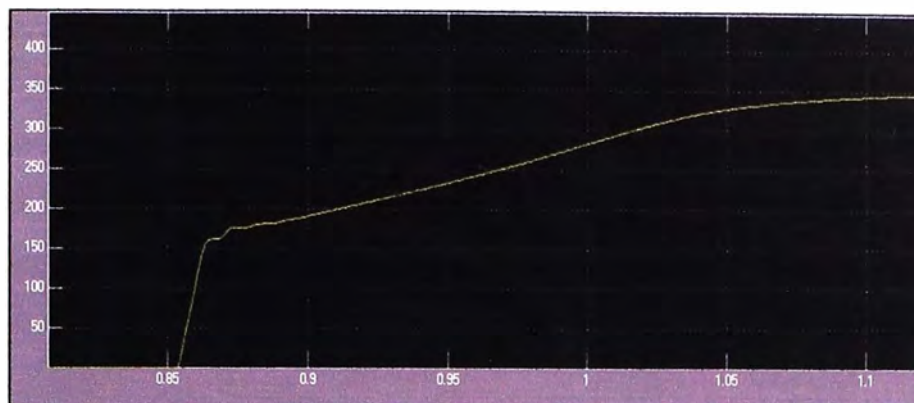


Fig.6.10 Proceso de carga del condensador DC

6.3.4 Activación del inversor y sincronización con el generador

Se activará el Inversor PWM sacando las llaves de potencia del estado de alta impedancia, para así poder controlar el circuito del inversor a través de los IGBT's.

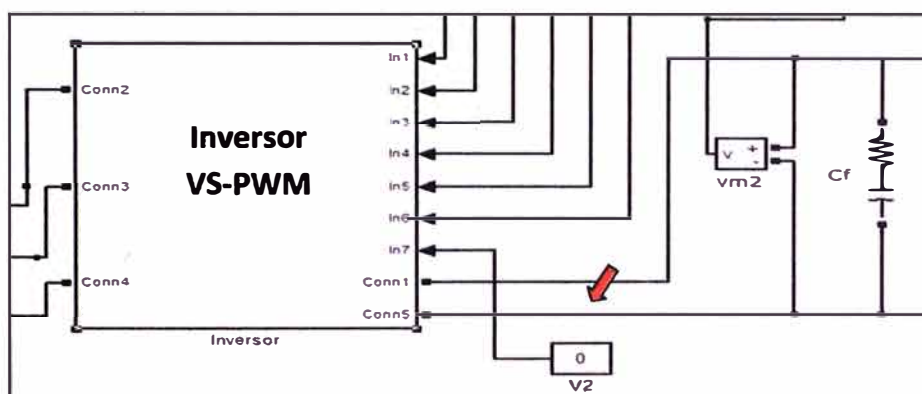


Fig.6.11 Posición de alta impedancia de las llaves IGBT's del inversor PWM

El bloque inversor de la figura 6.11 corresponde al subcircuito de 6 llaves (figura 6.12):

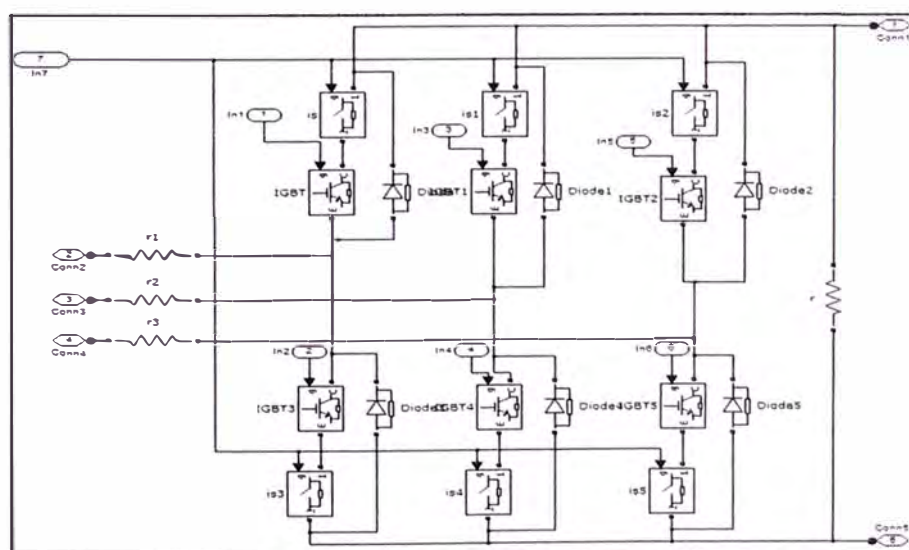


Fig.6.12 Subcircuito de las llaves de potencia IGBT's

Luego de ser habilitado el PWM, en $t=t_4$ de la gráfica 6.9, se muestra que la tensión en los terminales AC del inversor, ha cambiado de ser una onda casi senoidal (senoidal debido al generador pero con recortes en los picos debido a la actuación del condensador DC), a ser una onda de pulsos. En la siguiente figura 6.13, se aprecia el detalle del comportamiento de la tensión en los terminales del inversor, y la corriente inversor-generador, justo antes y después de la habilitación de las llaves del inversor PWM

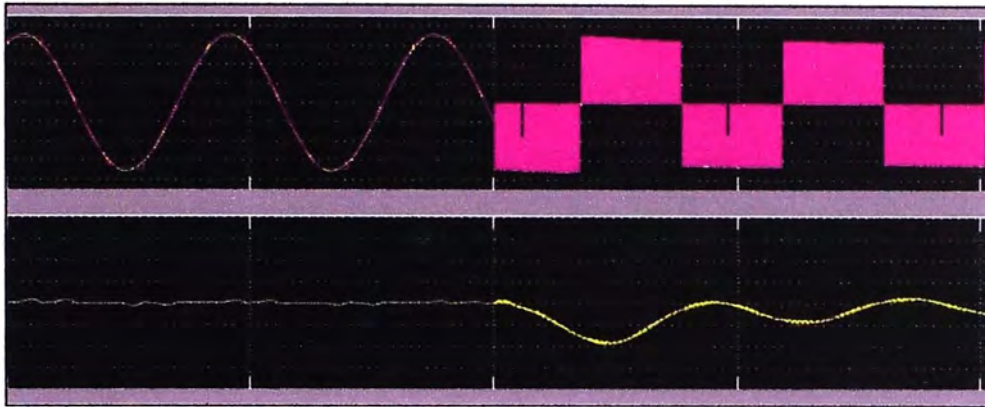


Fig.6.13 Tensión del inversor y corriente generador-inversor con PWM habilitado

Asimismo, en esta etapa en la que se encuentra operando el inversor, se deberá verificar que la frecuencia del generador sea igual a 60Hz. Bajo esta condición, el PLL que brinda la señal al inversor PWM, deberá pasar de estar conectado con el generador (en donde es dependiente de su fase y frecuencia), a la posición de recibir una señal independiente tipo triangular de 60Hz en fase con la frecuencia del generador.

Se debe hacer doble click al bloque PLL para poder realizar los cambios en el subcircuito:

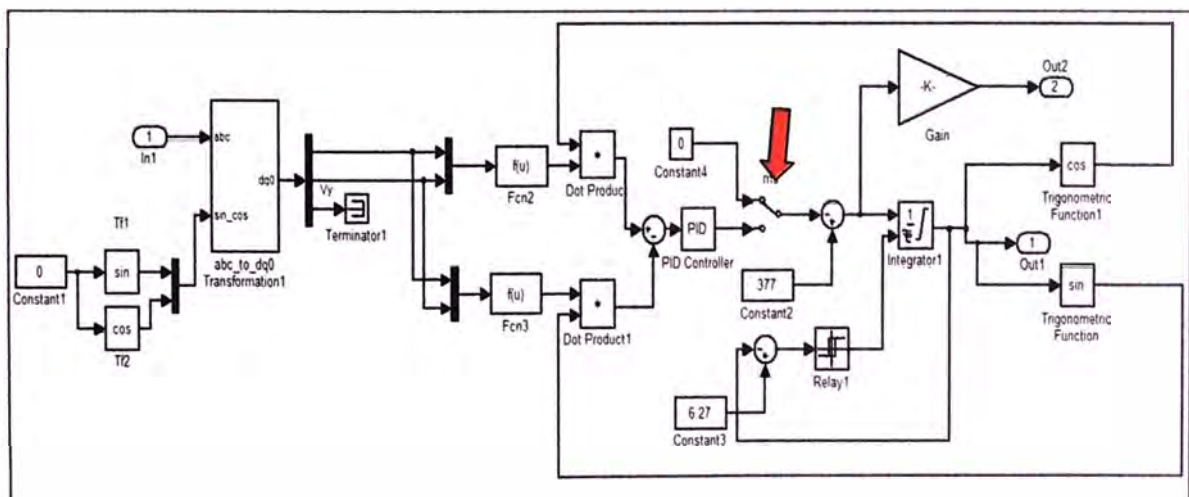


Fig.6.14 Subcircuito del PLL en posición de 60Hz

Con esto, se producirá la sincronización y el equilibrio entre el generador y el sistema de control del inversor PWM que opera como una red de generación independiente con 60Hz de frecuencia constante y en fase con el generador.

6.3.5 Incremento de la velocidad del generador y generación de potencia en vacío

Si se mantiene el estado de igualdad entre ambos sistemas por un tiempo dado, no se estaría generando potencia activa, y la única energía sería la almacenada por el condensador C_{DC} , y por lo tanto éste se descargaría cayendo la tensión V_{DC} , ya que será consumida por los requerimientos del PWM y por las pérdidas en el generador y tal como se puede apreciar en las gráficas 6.6 y 6.8 para un tiempo inmediatamente después de $t=t_4$. Es por ello que es necesario aumentar la velocidad rotórica del generador (que está igual a la velocidad síncrona), a fin de dar lugar a un deslizamiento y así generar potencia activa. Se incrementará la velocidad del motor primo acoplado al eje del generador, aumentando la tensión de armadura del motor primo de 482V hasta 502V.

En $t=t_4$ de la gráfica 6.5, se aumenta la velocidad rotórica de 188.5rad/s (velocidad síncrona), y en $t=t_5$, la velocidad ya se ha estabilizado en 196rad/s.

En la siguiente figura 6.15, se aprecia un detalle del incremento de la velocidad rotórica del generador:

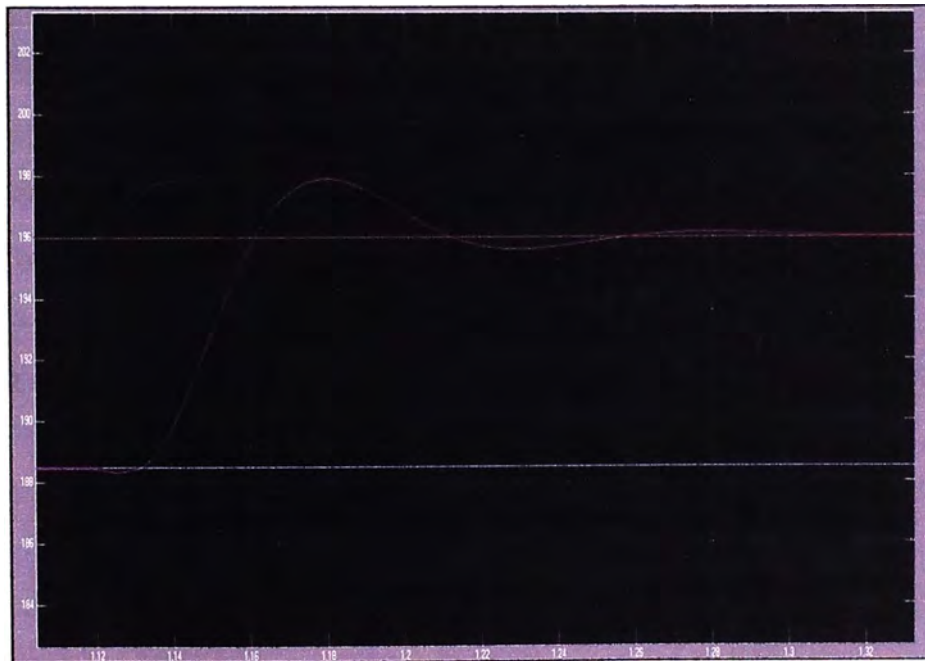


Fig.6.15 Incremento de la velocidad rotórica de 188.5rad/s a 196rad/s

Asimismo, para $t=t_5$ de la gráfica 6.6, la tensión del generador se ha estabilizado finalmente en 222.3Vrms (314.38Vpico).

Por otro lado, para $t=t_5$ en la parte superior de la gráfica 6.8, se aprecia que la tensión del condensador V_{DC} se ha estabilizado en el valor de la tensión de control de 400V. En la parte inferior de la gráfica 6.8, se aprecian los disparos realizados por el relé del comparador de histéresis.

En la siguiente figura 6.16, se aprecia un detalle de la variación de la tensión del condensador DC, y los disparos del comparador de histéresis:

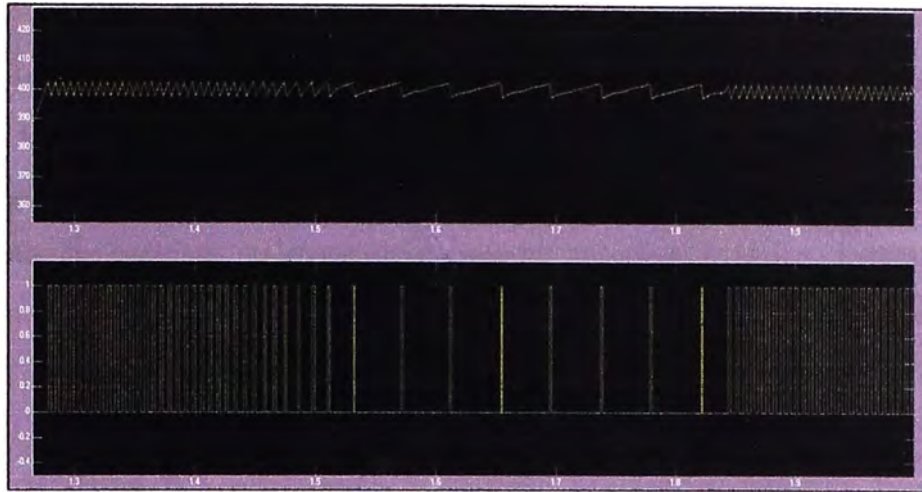


Fig.6.16 Detalle de la tensión del condensador DC y disparos del comparador

Debido al exceso de la potencia generada, ésta se disipará en la resistencia R_{DC} , mediante su conexión y desconexión para balancear la potencia en el sistema, conectándose cuando se desea consumir potencia en exceso del generador (potencia del generador mayor que la potencia de la carga AC), y desconectándose cuando se desea rechazar carga (potencia del generador es menor que la demandada por la carga AC).

La relación que existe entre la conexión y desconexión de la carga DC con la tensión V_{DC} es indicada por el aumento o disminución de la tensión DC al llegar al valor máximo y mínimo de la tensión de control (consigna) de 400V.

Este método de regulación de la tensión se denomina regulación con carga DC, y funciona de la siguiente manera:

- Cuando la potencia generada sea mayor que la potencia demandada por la carga AC, la tensión VAC aumentará, y el exceso de potencia irá a la carga DC, aumentando la tensión VDC. Esto llevará a que sólo se permita el incremento de tensión hasta $400+2.5V$, pasando este valor se cerrará el IGBT de la resistencia DC para poder consumir este exceso de potencia y disiparla al exterior como calor.
- Cuando la potencia generada sea menor que la potencia demandada por la carga AC, la tensión VAC disminuirá, y el déficit de potencia disminuirá la tensión VDC. Si la carga DC está conectada se deberá realizar la desconexión de la misma, siempre y cuando la tensión disminuya a $400-2.5V$, por debajo de este valor se abrirá el switch de la resistencia DC y la tensión se estabilizará siempre que el retiro de la carga DC equilibre las potencias generada y demandada.

6.3.6 Conexión, incremento gradual y desconexión de carga trifásica resistiva

Para el sistema de generación propuesto con control de tensión y frecuencia en una red aislada, el aumento de la potencia generada deberá incrementarse conforme se incremente la demanda requerida por las cargas del sistema, sin embargo para fines prácticos de la simulación, se deberá mantener en todo momento constante la velocidad de 196rad/s en el eje del rotor y para un deslizamiento de -3.98%.

El procedimiento consiste en aumentar la carga resistiva trifásica, ingresando cuatro resistencias en paralelo y una por una, para una potencia consumida de 0 a 1.20kW:

Cabe aclarar que el valor de la corriente del generador y de la carga en las gráficas 6.6 y 6.7, han sido ampliadas en diez veces a fin de poder tener una mejor visualización.

En $t=t_6$ de la figura 6.7, se conecta la primera resistencia, teniendo como valor de resistencia equivalente a $R_{AC\ eq.}=160\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=0.31kW$, y la tensión rms de la carga se estabiliza en 222.6V, y la corriente rms 0.8035A.

En $t_6<t<t_7$ de la figura 6.7, se conecta la segunda resistencia en paralelo, teniendo como valor equivalente a $R_{AC\ eq.}=80\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=0.62kW$, y la tensión rms de la carga se estabiliza en 222.2V, y la corriente rms de valor 1.602A.

En $t=t_7$ de la figura 6.7, se conecta la tercera resistencia en paralelo, teniendo como valor equivalente a $R_{AC\ equivalente}=53.33\Omega$, la cual demanda una potencia de $P_L=0.93kW$, y con ello la tensión rms de la carga se estabiliza en 222.3V, y la corriente rms de valor 2.408A.

En $t_7<t<t_8$ de la figura 6.7, se conecta la última resistencia en paralelo, teniendo como valor de resistencia equivalente a $R_{AC\ equivalente}=40\Omega$, que demanda una potencia $P_L=1.20kW$, y con ello la tensión rms de la carga se estabiliza en 222.1V, y la corriente rms 3.202A. Así, la tensión en el condensador DC en $t_7<t<t_8$ de la figura 6.8, va oscilando más lentamente debido a los disparos del comparador de histéresis, para garantizar una tensión regulada en los bornes del generador asíncrono.

El siguiente y último paso consiste en desconectar las cargas del sistema de generación (rechazo de carga), y para lo cual se deberá de retirar las cuatro resistencias trifásicas a la vez, pasando así de consumir una potencia de 1200W a 0W.

En $t=t_8$ de la figura 6.7, se aprecia que debido a la desconexión de la carga, su tensión y corriente se reducen a cero, y el valor de la tensión del generador se estabiliza en 222.4V según se muestra en $t=t_8$ de la figura 6.6. La tensión en el condensador DC en $t=t_8$, vuelve a oscilar rápidamente debido a los disparos más continuos del comparador de histéresis debido al exceso de potencia activa producido por el rechazo de carga.

En conclusión, durante y después del rechazo de carga, se comprueba que el sistema funciona satisfactoriamente, logrando que la tensión de generación se mantenga estable. La verificación experimental de las simulaciones realizadas líneas arriba, es validada con las gráficas de las pruebas realizadas a un sistema de generación similar al del presente informe, y que son presentados en el anexo A.

6.4 Análisis de los resultados obtenidos

Luego de realizar las simulaciones tanto para el aumento de carga gradual y el rechazo de carga y con la finalidad de comprobar que el sistema propuesto funciona correctamente, es necesario realizar algunos cálculos a fin de poder analizar los resultados.

6.4.1 Análisis de la operación del sistema de generación original

Los siguientes valores fueron recopilados luego de realizar la simulación del sistema original sin regulación descrito en el capítulo previo, en donde se aprecia que la potencia consumida por la carga varía de 0 a 1.35kW y el rechazo de carga a cero.

Considerando durante toda la simulación una tensión de armadura constante $E_o=482V$ del motor primo y una velocidad rotórica también constante de $\omega_r=188.5rad/s$, se obtienen:

Tabla N° 6.1 Operación del sistema original con aumento y rechazo de carga [16]

N°	Estado	V gen (V)	I gen (A)	P gen (kW)	f (Hz)	R _L (Ω)	V _L (V)	I _L (A)	P _L (kW)
0	Generación en vacío	252.50	14.80	3.093	59.69	0.00	252.50	0.0000	0.00
1	Primera carga	248.90	14.34	2.934	59.26	160.00	248.90	0.9014	0.39
2	Segunda carga	241.20	14.23	2.847	58.86	80.00	242.90	1.7390	0.73
3	Tercera carga	238.70	14.02	2.754	58.46	53.33	234.80	2.5520	1.04
4	Cuarta carga	228.50	13.63	2.565	58.07	40.00	234.40	3.3270	1.35
5	Rechazo de carga	252.40	14.79	3.078	59.37	0.00	252.40	0.0000	0.00

En donde:

V gen (V)	:	Tensión en los terminales del generador
I gen (A)	:	Corriente a la salida del generador
P gen (kW)	:	Potencia de salida del generador
f (Hz)	:	Frecuencia del sistema
R _L (Ω)	:	Resistencia de la carga
V _L (V)	:	Tensión de la carga
I _L (A)	:	Corriente de la carga
P _L (kW)	:	Potencia consumida por la carga

- Como sabemos la tensión nominal de generación esperada es de 220V. Calculando los valores de tolerancia para la calidad del producto de la tensión según la NTCS DS 020-97-EM para todas las cargas conectadas, y utilizando la ecuación 2.23 del capítulo II $\Delta V_k (\%) = (V_k - V_n) / V_n * 100\%$, tenemos los siguientes valores:

Tabla N° 6.2 Tolerancias calidad de la tensión NTCSE para el sistema original [16]

N°	V _n (V)	V _L = V _k (V)	ΔV_k (%) (V)
0	220.00	252.50	14.77%
1	220.00	248.90	13.14%
2	220.00	242.90	10.41%
3	220.00	234.80	6.73%
4	220.00	234.40	6.55%
5	220.00	252.40	14.73%

Con la tabla 6.2, se puede apreciar que las tolerancias ΔV_k (%) obtenidas exceden el +5% y +7.5% de la tensión nominal exigidos por la norma para zonas urbanas y rurales respectivamente, y por lo tanto la energía será considerada como energía de mala calidad.

- La gráfica V_L (V) versus P_L (kW) correspondiente al sistema original, muestra la necesidad de regular la tensión de la carga:

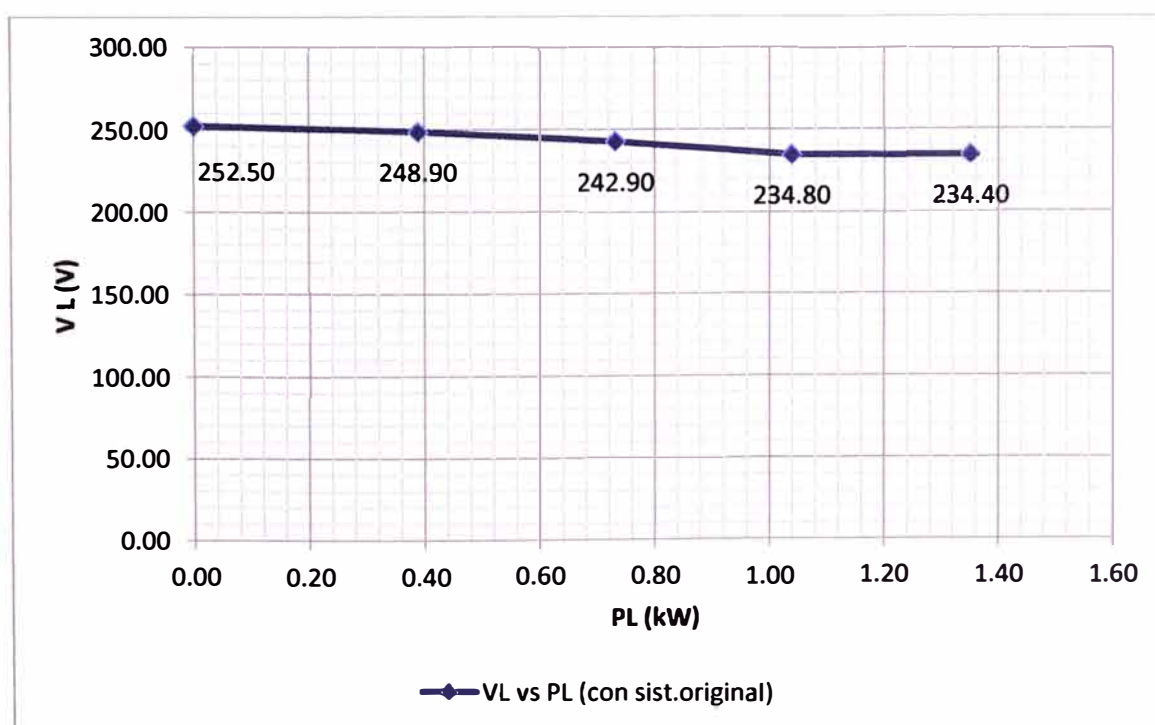


Fig.6.19 Gráfica tensión de la carga vs potencia consumida del sistema original

- Como sabemos la frecuencia nominal de generación esperada es de 60Hz. Calculando los valores de tolerancia para la calidad del producto para la frecuencia según la NTCS DS 020-97-EM para todas las cargas conectadas, y utilizando la ecuación 2.24 del capítulo II $\Delta f_k (\%) = (f_k - f_n) / f_n * 100\%$, tenemos los siguientes valores mostrados líneas abajo:

Tabla N° 6.3 Tolerancias calidad de la frecuencia NTCSE del sistema original [16]

N°	fn (Hz)	fL = fk (Hz)	Δf_k (%) (Hz)
0	60.00	59.69	-0.52%
1	60.00	59.26	-1.23%
2	60.00	58.86	-1.90%
3	60.00	58.46	-2.57%
4	60.00	58.07	-3.22%
5	60.00	59.37	-1.05%

Con la tabla 6.3, se puede apreciar que las tolerancias Δf_k (%) exceden el -0.6% de la frecuencia nominal exigidos por la norma, y por lo tanto la energía será considerada como energía de mala calidad.

- La gráfica f (Hz) versus PL (kW) correspondiente al sistema original, muestra la necesidad de regular la frecuencia de la carga:

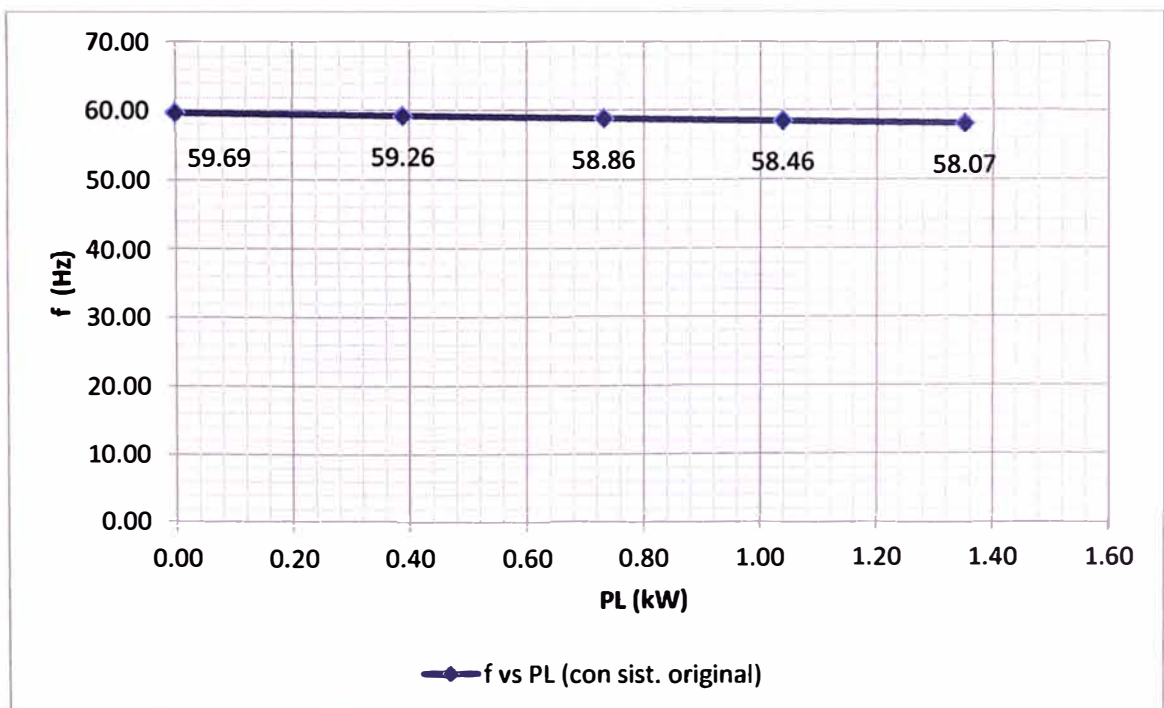


Fig.6.20 Gráfica frecuencia de la carga vs potencia consumida del sistema original

6.4.2 Análisis de la operación del sistema de control propuesto

Los siguientes valores fueron recopilados luego de realizar la simulación del sistema de control propuesto descrito al inicio del presente capítulo, en donde se aprecia que la potencia consumida por la carga varía de 0 a 1.23kW y el rechazo de carga lo llevará a cero nuevamente.

Considerando que en la simulación inicialmente la tensión inicial de armadura del motor primo será $E_o=482V$ y una velocidad rotórica de $\omega_r=188.5\text{rad/s}$. Luego se aumentará el valor de la tensión de armadura a $E_o=502V$, aumentando así la velocidad rotórica a $\omega_r=196\text{rad/s}$. Asimismo, el deslizamiento de la máquina correspondiente será -3.98% y el índice de modulación del PWM se mantendrá constante en 0.8799. Con todo ello se obtienen los siguientes valores mostrados en la tabla 6.4:

Tabla N° 6.4 Operación del sistema propuesto con aumento y rechazo de carga [16]

N°	Estado	V gen (V)	I gen (A)	P gen (kW)	f (Hz)	RL (Ω)	VL (V)	IL (A)	PL (kW)
0	Generación en vacío	222.30	12.25	2.254	60.00	0.00	222.30	0.0000	0.00
1	Primera carga	222.40	12.33	2.254	60.00	160.00	222.60	0.8035	0.31
2	Segunda carga	222.00	12.24	2.254	60.00	80.00	222.20	1.6020	0.62
3	Tercera carga	222.30	12.32	2.254	60.00	53.33	222.30	2.4080	0.93
4	Cuarta carga	221.80	12.34	2.254	60.00	40.00	222.10	3.2020	1.23
5	Rechazo de carga	222.40	12.29	2.254	60.00	0.00	222.40	0.0000	0.00

- La tensión nominal de generación esperada es de 220V. Calculando los valores de tolerancia para la calidad del producto de la tensión según la NTCS DS 020-97-EM para todas las cargas conectadas:

Tabla N° 6.5 Tolerancias calidad de la tensión NTCSE para el sistema propuesto [16]

N°	Vn (V)	VL (V)	ΔV_k (%) (V)
0	220.00	222.30	1.05%
1	220.00	222.60	1.18%
2	220.00	222.20	1.00%
3	220.00	222.30	1.05%
4	220.00	222.10	0.95%
5	220.00	222.40	1.09%

Con la tabla 6.5, se puede apreciar que los valores obtenidos ΔV_k (%) se encuentran

dentro del rango de $\pm 5\%$ y $\pm 7.5\%$ de la tensión nominal exigidos por la norma para zonas urbanas y rurales respectivamente, y por lo tanto la energía será considerada como energía de calidad.

- La gráfica V_L (V) versus P_L (kW) correspondiente al sistema de control propuesto, muestra la buena regulación de la tensión de la carga:

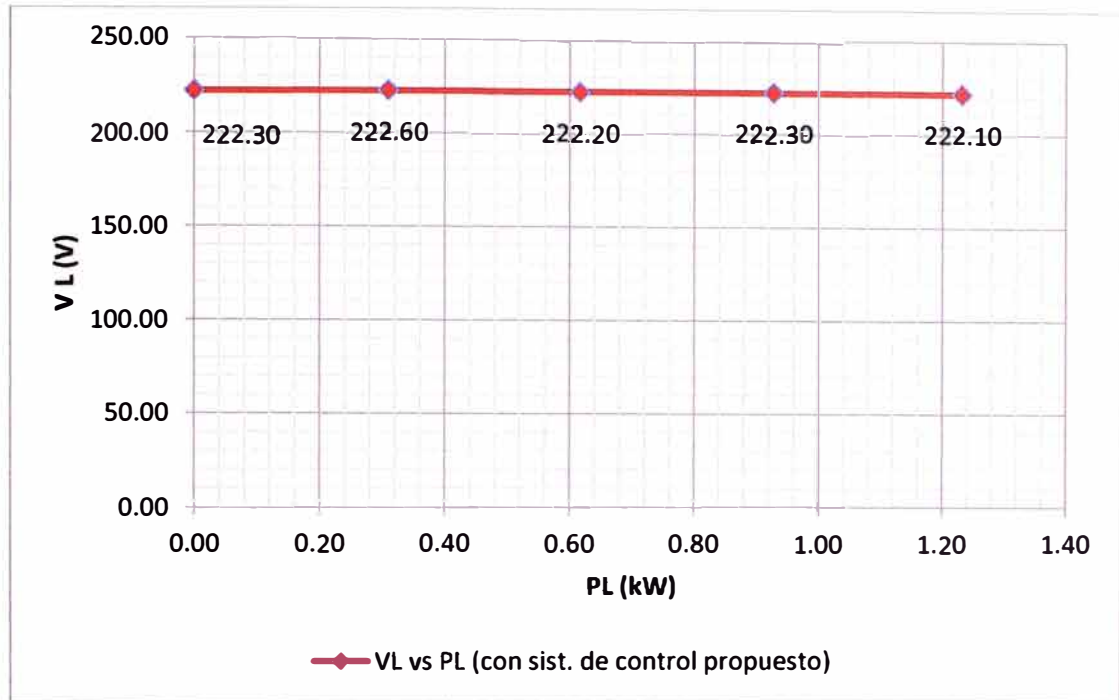


Fig.6.21 Gráfica tensión de la carga vs potencia consumida del sistema propuesto

- Debido a que la frecuencia nominal de generación ha sido seteada en 60Hz por el PLL, los valores de tolerancia para la calidad del producto de la frecuencia según la NTCSE DS 020-97-EM para todas las cargas conectadas, serán de valor “cero”:

Tabla N° 6.6 Tolerancias calidad de la frecuencia NTCSE del sist. propuesto [16]

N°	f_n (Hz)	f (Hz)	Δf_k (%) (Hz)
0	60.00	60.00	0.00%
1	60.00	60.00	0.00%
2	60.00	60.00	0.00%
3	60.00	60.00	0.00%
4	60.00	60.00	0.00%
5	60.00	60.00	0.00%

Con la tabla 6.6, se puede apreciar que los valores obtenidos Δf_k (%) son ceros y se encuentran dentro del rango de $\pm 0.6\%$ la frecuencia nominal exigida por la norma NTCSE, y por lo tanto la energía será considerada como energía de calidad.

- La gráfica f (Hz) versus P_L (kW) correspondiente al sistema de control propuesto, muestra la buena regulación de la frecuencia en la carga:

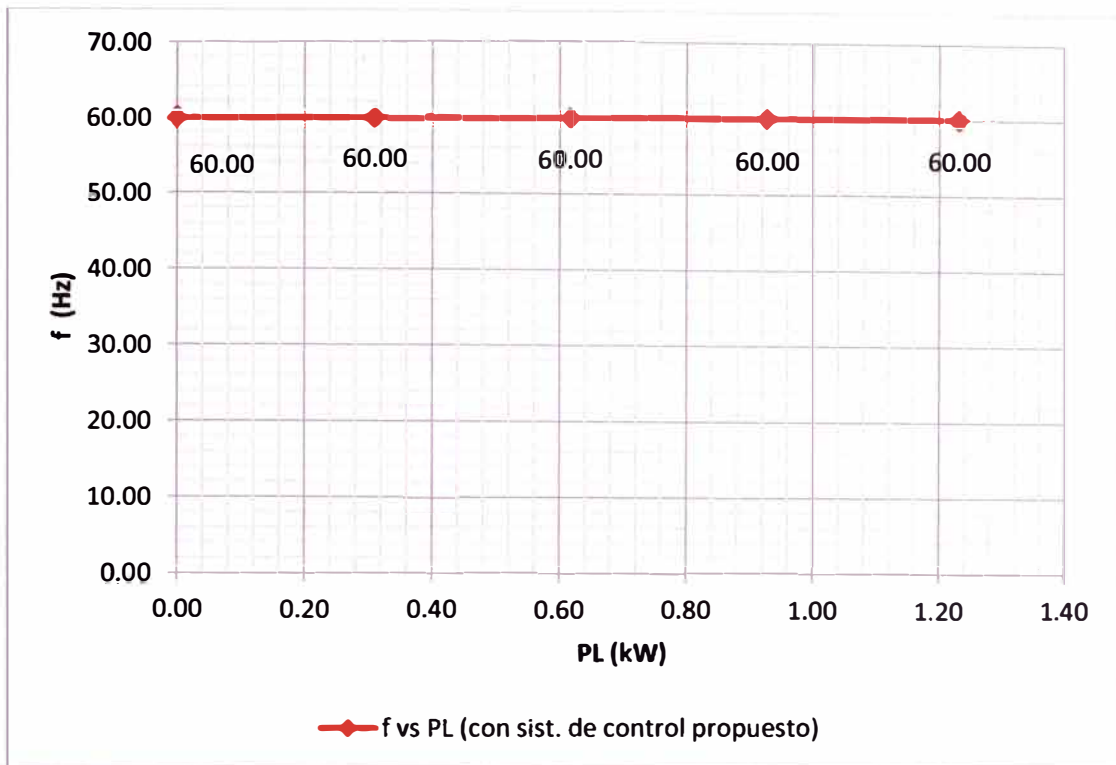


Fig.6.22 Gráfica frecuencia de la carga vs potencia consumida del sistema propuesto

6.4.3 Comparación gráfica del sistema original vs el sistema de control propuesto

A continuación se presentan las gráficas comparativas de ambos sistemas:

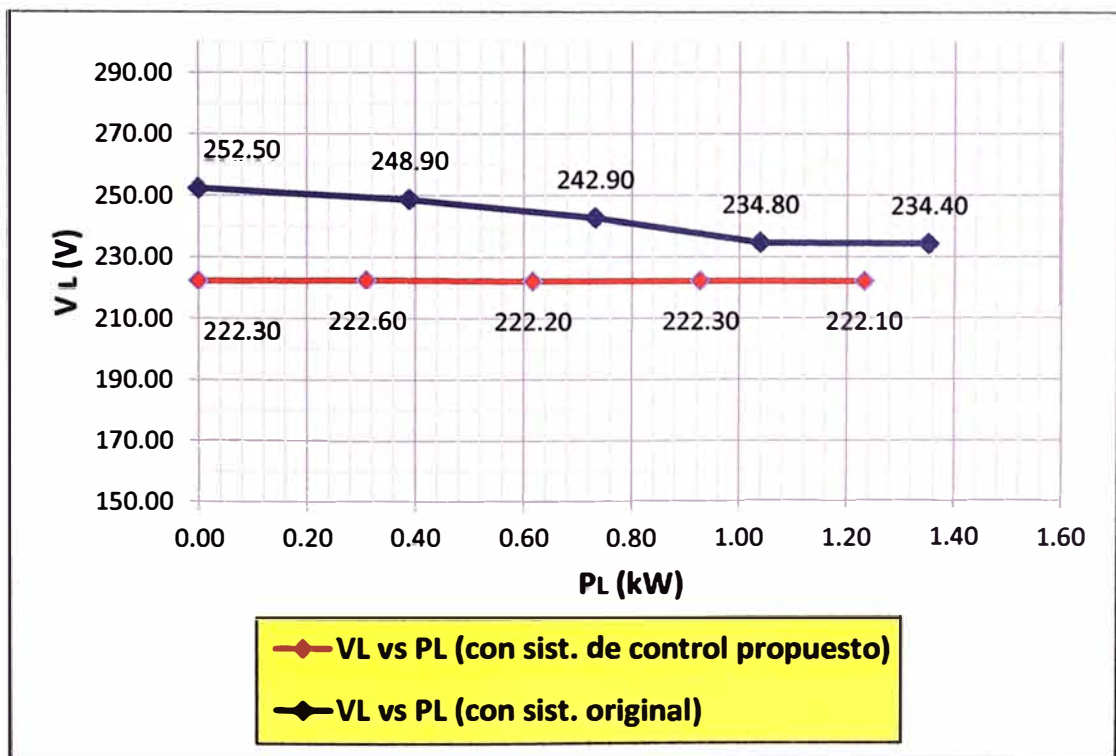


Fig.6.23 Gráfica tensión vs potencia sistema original vs sistema de control propuesto

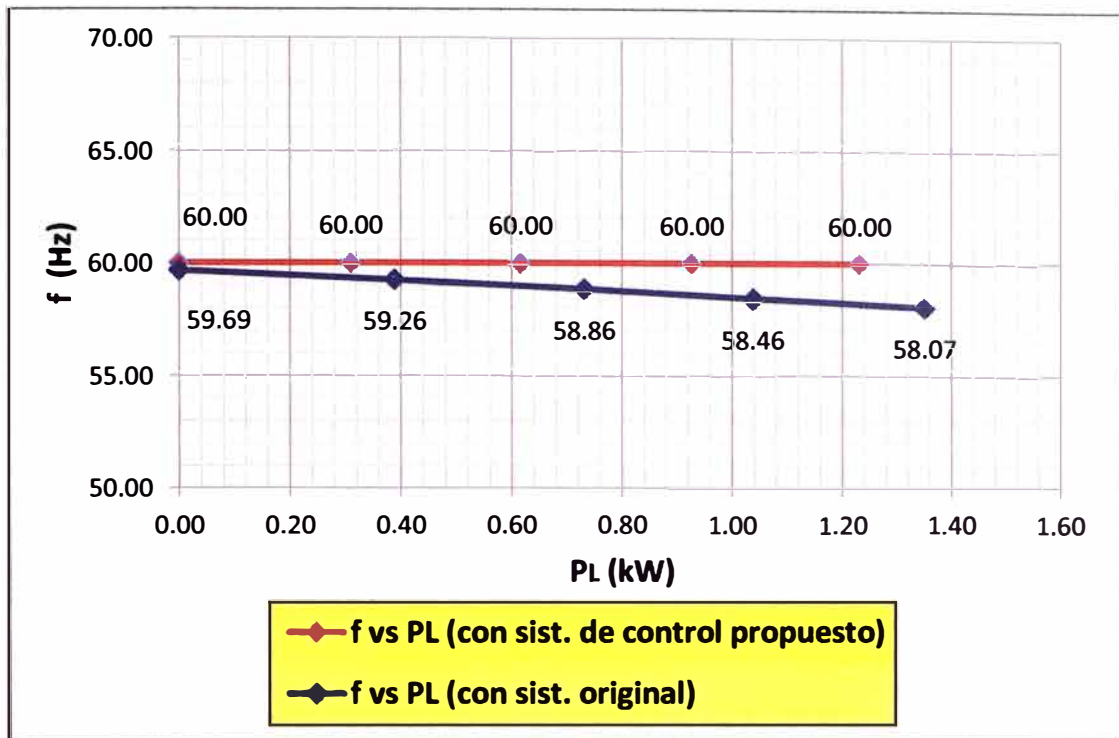


Fig.6.24 Gráfica frecuencia vs potencia sistema original vs sist. de control propuesto
 Con la comparación de las gráficas para la tensión y para la frecuencia, durante y después del rechazo de carga, se reafirma que el sistema propuesto de regulación de tensión y frecuencia funciona satisfactoriamente.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS ECONOMICO REFERENCIAL DEL SISTEMA DE GENERACION

En este capítulo se muestra un análisis económico referencial, en la cual se han estimado los costos de lo que podría significar la implementación del sistema de generación y control propuesto.

7.1 Costo estimado del Suministro de equipos de generación y control

Tal como se explicó en los capítulos anteriores, los equipos principales de generación, turbina y generador, serán reemplazados por un motor de inducción tipo jaula de ardilla y por una bomba operada en sentido inverso. El precio en el mercado de este grupo turbogenerador junto con el sistema:

Tabla N° 7.1 Precio del suministro de equipos de generación y control [17]

ITEM	DESCRIPCION	PRECIO (US\$)
A	SUMINISTRO DE EQUIPOS	
1.0	EQUIPO PRINCIPAL DE GENERACION	
1.1	Motor Trifásico Estándar 3 HP. 1800RPM	161.15
	Marca: Importada Tipo: Estándar Tensión: 220/380/440V/trifásico/60Hz. Norma IEC, Hermeticidad IP55, Servicio continuo Montaje Horizontal, Toma de tierra, 4 polos	
1.2	Bomba centrífuga	1,582.37
	Marca: Importada Líquido a bombear : Agua limpia Caudal (litros/seg.) : 11, A.D.T. (m.c.a.) : 12 Eficiencia (%) : 69.2, Sellado : Mecánico Ø Succión (pulg.) : 3" (Rosca NPT-F) Ø Descarga (pulg.) : 2" (Rosca NPT-F)	
	SUB TOTAL 1.0 EQUIPO PRINCIPAL (US\$):	1,743.52
2.0	EQUIPO DE CONTROL	
2.1	Convertidor - Inversor VS-PWM	749.06
	Marca: Importada Tipo: Trifásico Tensión: 220V, 60Hz. Para motor de 3hp. Incluye equipos de protección.	
2.2	Comparador de Histéresis, PLL, Inductancias	249.69
	SUB TOTAL 2.0 EQUIPO DE CONTROL (US\$):	998.75

3.0	RESISTENCIAS Y CONDENSADORES	
3.1	Banco de resistencias AC, 220VAC	290.59
3.2	Banco de resistencias DC, 400VDC	174.35
3.3	Banco de condensadores AC, 220VAC	96.86
3.4	Banco de condensadores DC, 400VDC	58.12
	SUB TOTAL 3.0 RESISTENCIAS Y CONDENSADORES (US\$):	619.92
4.0	SUB TOTAL 4.0 OTROS EQUIPOS (US\$):	348.70
	TOTAL SUMINISTRO DE EQUIPOS (US\$+IGV)	3,710.89

7.2 Costo estimado del Montaje e instalación de equipos de generación y control

A continuación se muestran algunos costos referenciales del costo de la instalación de los equipos a implementar:

Tabla N° 7.2 Precio del montaje e instalación de equipos de generación y control [17]

ITEM	DESCRIPCION	PRECIO (US\$)
B	MONTAJE E INSTALACION DE EQUIPOS	
1.0	EQUIPO PRINCIPAL DE GENERACION	
1.1	Montaje de Motor Trifásico Estándar 3 HP. 1800RPM	107.43
1.2	Montaje de Bomba centrífuga	1,054.91
2.0	EQUIPO DE CONTROL	
2.1	Montaje de Convertidor - Inversor VS-PWM, Comparador de Histéresis, PLL, Inductancias	665.83
3.0	RESISTENCIAS Y CONDENSADORES	
3.1	Banco de resistencias AC y DC y Banco de condensadores AC y DC.	413.28
3.2	Montaje de otros equipos	232.47
	TOTAL MONTAJE E INSTALACION DE EQUIPOS (US\$+IGV)	2,473.93

7.3 Costo estimado de la implementación del sistema de generación y control

El siguiente costo estimado no incluye las obras civiles, ni el suministro y obras de captación del recurso hidráulico:

Tabla N° 7.3 Precio implementación del sistema de generación y control [17]

ITEM	DESCRIPCION	PRECIO (US\$)
A	SUMINISTRO DE EQUIPOS	
	SUBTOTAL SUMINISTRO DE EQUIPOS (US\$+IGV)	3,710.89
B	MONTAJE E INSTALACION DE EQUIPOS	
	SUBTOTAL MONTAJE E INSTALACION DE EQUIPOS (US\$+IGV)	2,473.93
C	SUPERVISION E INGENIERIA (8%)	
	SUBTOTAL SUPERVISION E INGENIERIA (US\$+IGV)	494.79
D	GASTOS GENERALES Y UTILIDADES (15%)	
	SUBTOTAL GASTOS GENERALES Y UTILIDAD (US\$+IGV)	927.72
	TOTAL MONTAJE E INSTALACION DE EQUIPOS (US\$+IGV)	7,607.33
	IGV (18%)	1,369.32
	TOTAL MONTAJE E INSTALACION DE EQUIPOS (US\$)	8,976.65

CONCLUSIONES

A continuación se resaltan las siguientes conclusiones:

1. La utilización de un equipo de bombeo operando en sentido inverso acoplado a un motor de inducción operado como generador de inducción y aislado de la red eléctrica, es una opción real y no compleja para la generación con plantas minihidroeléctricas a partir de pequeños flujos hidráulicos, generalmente propios de zonas rurales en nuestro país y aislados de la red interconectada.
2. Debido a los costos relativamente altos en el mercado de generadores eléctricos y equipos de control como reguladores de velocidad y de tensión que en muchas de las ocasiones son equipos de importación; el esquema de generación usando motores asíncronos en sentido inverso con regulación de tensión mediante un inversor PWM, es una alternativa que puede incentivar la generación hidráulica en pequeña escala como fuente de energía renovable.
3. Con el uso de las tecnologías actuales como el control electrónico, se puede mejorar el desempeño del sistema de generación con máquinas de inducción operadas como generadores.
4. La ausencia de un regulador de velocidad mecánico, el empleo de un sistema de control sencillo y el uso de un generador de inducción autoexcitado, son características importantes que hacen al sistema robusto y confiable.
5. El inversor VS-PWM se encargará de fijar una frecuencia constante y de garantizar la regulación de la tensión en los terminales del generador.
6. Luego de las simulaciones y el análisis realizado, el control de la tensión con carga DC demostró ser un método efectivo para mantener la regulación de la tensión del generador. Asimismo, es capaz de soportar la conexión, incremento y desconexión de cargas resistivas trifásicas, manteniendo una tensión regulada, frecuencia constante, ambas dentro de los rangos de la norma NTCSE que la definen como energía de calidad.

ANEXOS

ANEXO A:
RESULTADOS EXPERIMENTALES REFERENCIALES

Los resultados experimentales se obtuvieron del sistema presentado en la Fig. 5.1 del informe, usando una máquina de inducción cuyos parámetros están en la Tabla A.1:

Tabla N° A.1 Parámetros de la máquina de inducción a 60Hz [18]

Características	Valores
Resistencia del estator	4.4Ω
Resistencia del rotor	5.02Ω
Reactancia de fuga del estator	5.9Ω
Reactancia de fuga del rotor	5.9
Reactancia de acoplamiento	70.53Ω
Resistencia de pérdidas mecánicas del hierro	582Ω
Potencia nominal	1/2hp
Número de Polos	4
Inercia del rotor	0.0006 kg.m2

Un inversor conformado por IGBT's (transistor bipolar de compuerta aislada) conmutado a 5kHz, disponible comercialmente, fue empleado como el inversor VS-PWM. Los componentes adicionales son $C_{AC} = 37 \mu F$, $C_{DC} = 2400 \mu F$, $L_f = 5 mH$ y $R_{DC} = 120 \Omega$.

El arranque del generador de inducción se dio a través de la auto-excitación producida por la interacción entre el flujo residual del rotor y el banco de condensadores de excitación.

La Fig. A.1 (a) presenta las tensiones de línea del VS-PWM, y la Fig. A.1 (b) presenta las tensiones de línea del generador de inducción. La tensión del generador es sinusoidal, debido a la buena acción del filtro, y donde los componentes de la tensión de frecuencia de conmutación del inversor no están presentes en los bornes del generador.

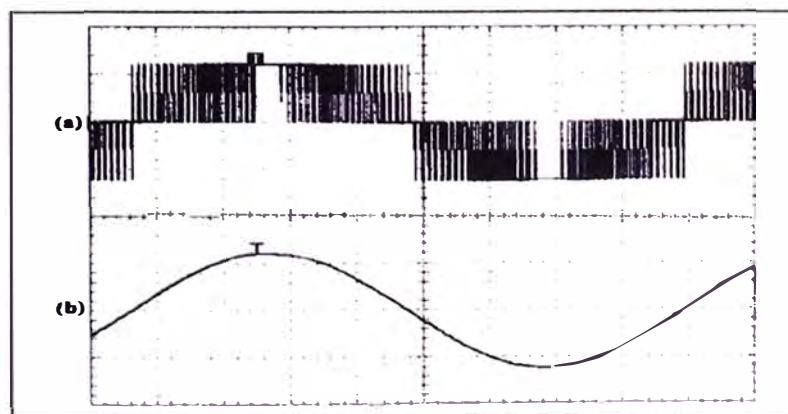


Fig.A.1 (a) Tensión de línea en los terminales del inversor PWM y (b) en los terminales del generador (vert: 250V/div, horiz:2ms/div)

Las corrientes de línea en los terminales del generador de inducción [Figs. A.2 (a) y A.3 (a)], a la salida del inversor VS-PWM [Figs. A.2 (b) y A.3 (b)], y en la carga AC [Fig. A.2

(c) y A.3 (c)], son presentados en los casos donde la potencia de la carga AC es 90% de la potencia nominal del generador (Fig. A.2) y cuando la carga AC está desconectada (Fig. A.3). En ambos casos mencionados, la corriente de línea del generador de inducción no se ve afectada por la potencia de la carga AC durante la operación en estado estacionario.

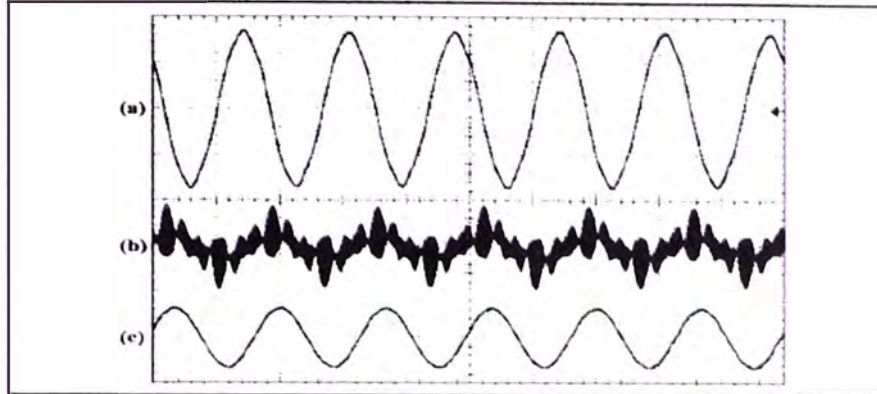


Fig.A.2 (a) Corriente de línea en los terminales del generador y (b) en los terminales del inversor PWM, y (c) en la carga (vert: 2A/div, horiz:10ms/div)

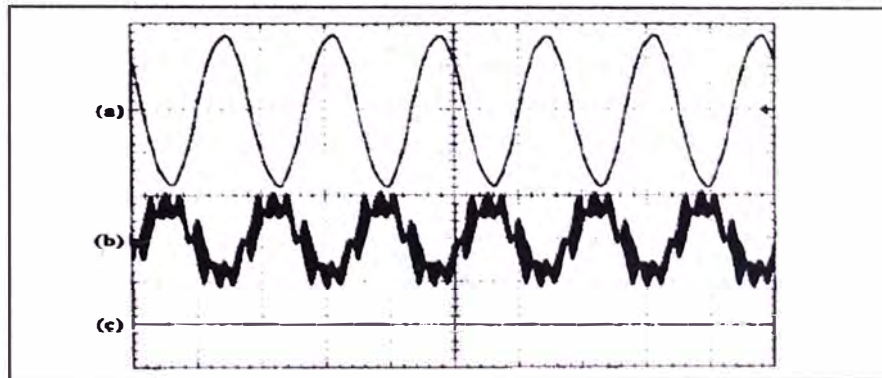


Fig.A.3 (a) Corriente de línea en los terminales del generador y (b) en los terminales del inversor PWM, y (c) en la carga (vert: 2A/div, horiz:10ms/div)

Una comparación entre las circunstancias con carga y sin carga (Figs. A.2 y A.3) muestran que la desconexión de la carga AC, causa un aumento significativo en la corriente de línea del inversor VS-PWM, como resultado del aumento de la potencia de exceso enviada a C_{DC} .

Las oscilaciones de alta frecuencia observadas en la corriente de línea del inversor son causadas por la conmutación del PWM. Estas corrientes de alta frecuencia fluyen a través de L_f y C_{AC} , y por lo que no están presentes en los bobinados del estator del generador.

**ANEXO B:
PROTOTIPO DE PLANTA MINIHIDROELÉCTRICA CONTROLADA
ELECTRÓNICAMENTE**

A continuación se muestra un prototipo de planta minihidroeléctrica controlada electrónicamente realizado por la empresa colombiana QT (qualification technology), la cual permite producir una energía eléctrica a partir de una energía hidráulica, para lo cual se ha utilizado una turbina para caídas de agua de 25 metros. Dentro de los componentes de control destacado, se ha usado el inversor SunEasy 2000.



Fig.B.1 Prototipo de planta minihidroeléctrica controlada electrónicamente

ANEXO C:
IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS MINIHIDROELÉCTRICAS CON BOMBAS
Y MOTORES DE INDUCCIÓN OPERADOS A LA INVERSA

- Las siguientes imágenes fueron extraídas del blog “Ask the Renewable Energy Guru” del 15 de enero del 2008, donde se muestra una implementación del sistema de minigeneración:

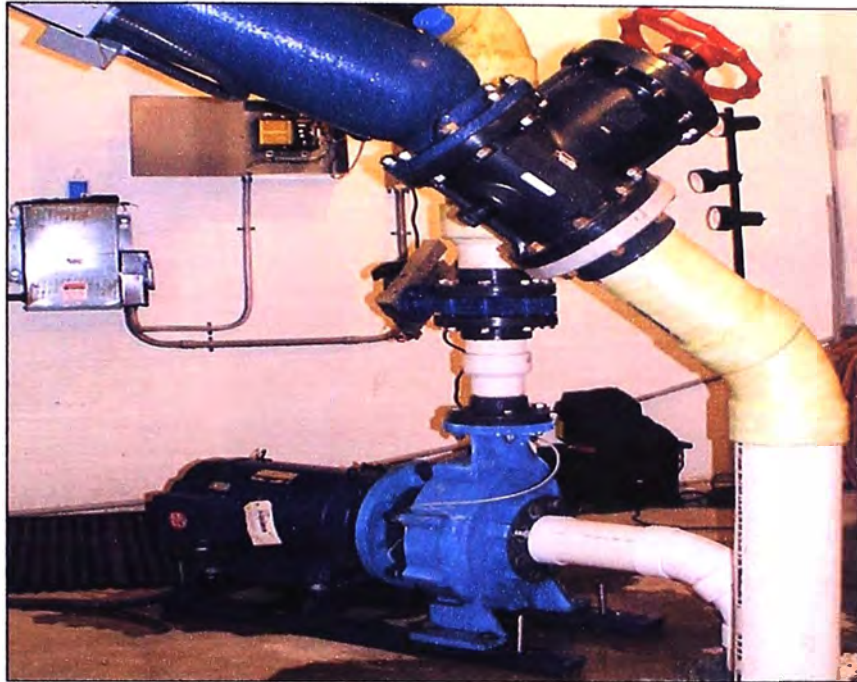


Fig.C.1 Empleado de una bomba/turbina y motor/generador de 30HP trifásico

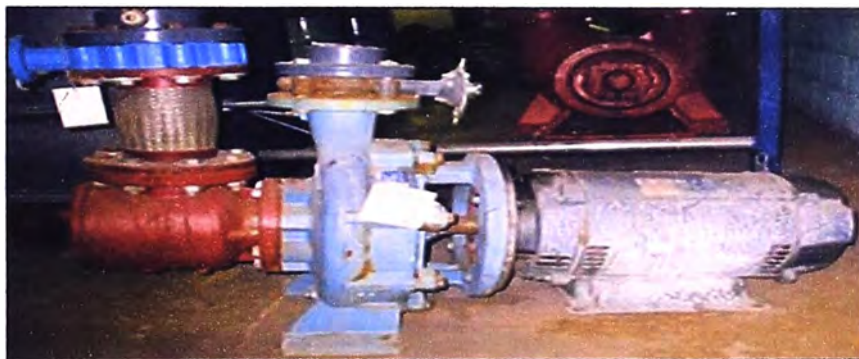


Fig.C.2 Bomba/motor operado a la inversa como turbina/generador



Fig. C.3 Banco de condensadores

- Las siguientes imágenes fueron extraídas de unos proyectos ejecutados por el departamento de investigación de Nottingham del Reino Unido, en la localidad de Thima, distrito de Kirinyaga, Kenya:



Fig. C.4 Un motor de inducción como generador que produce 2.2kW



Fig. C.5 Dos hornillas de cocina usados como resistencia de regulación

- Las siguientes imágenes fueron extraídas de unos proyectos ejecutados por el departamento de investigación de Nottingham del Reino Unido, en la localidad de Kathamba, distrito de Kirinyaga, Kenya:



Fig. C6 Generador de inducción de 1.1kW de 6 polos

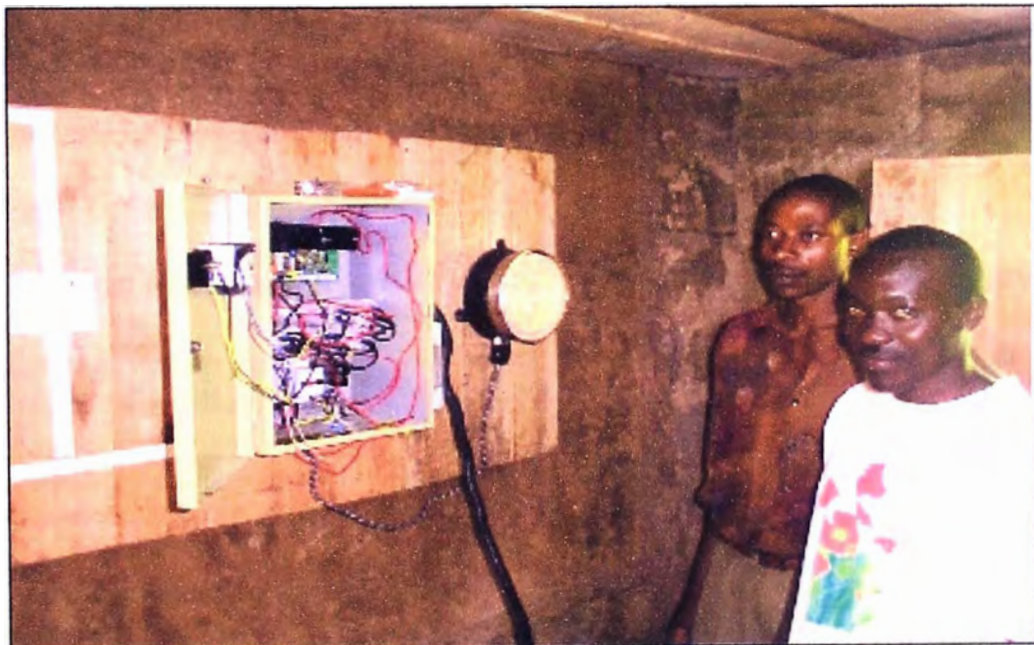


Fig. C.7 Controlador del generador y resistencia de disipación

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Ing. Daniel Mugerza, “Microcentrales hidroeléctricas”, 2003.
- [2] Ministerio de Energía y Minas (MEM) / Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), “Estudio del Plan Maestro de Electrificación Rural con Energía Renovable en la República del Perú”, 2008.
- [3] IDAE-Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía-España, “Minicentrales hidroeléctricas”, 2006.
- [4] Dirección general de energía (DG XVII), “Manual de pequeña hidráulica”, ESHA-European Small Hydropower Association, 1998.
- [5] M. Godoy Simoes - Felix A. Farret, “Alternative Energy Systems: Design and Analysis with induction Generators”, CRC Press, Taylor and Francis Group 2nd Edition, 2008.
- [6] Ing. Emmanuel Torres Montalvo, “Control de Voltaje del Generador de Inducción Auto-Excitado para Aplicaciones de micro/ mini Generación de Energía Eléctrica”, Tesis de Maestría en Ciencias Ingeniería Eléctrica, 2006
- [7] Simulink de Matlab, “Help Asynchronous Machine-Blocks”, versión 7.10, 2010
- [8] Emili Lupon, “Inversores PWM”, 2006
- [9] Juan Díaz Gonzáles, “Inversores PWM”, Universidad de Oviedo-España, 1999.
- [10] Curso “Acondicionamiento de fuentes de energías renovables”, Decimo quinto programa de titulación-UNI-FIEE, 2011.
- [11] Ministerio de Energía y Minas (MEM), “Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos-NTCSE”, Decreto Supremo N° 009-1999-EM, 2009.
- [12] José Luis López Salinas, “Plantas mini hidroeléctricas con bombas centrífugas y motores de inducción”, IEE Comité de generación-Capítulo de Potencia-Mexico, 2005.
- [13] Simulink de Matlab, “Parámetros de la máquina de inducción”, versión 7.10, 2010
- [14] Enes Goncalves y José Antenor, “Self-Excited Induction Generator Controlled by a VS-PWM Bidirectional Converter for Rural Applications”, IEEE Transactions on Industry Applications-Brazil, 1999.

- [15] Simulink de Matlab, “Parámetros del sistema de control”, versión 7.10, 2010.
- [16] Comparación de los resultados arrojados por el Simulink de Matlab, versión 7.10, 2010.
- [17] Costos estimados en base a precios referenciales del mercado, 2012.
- [18] Enes Goncalves y José Antenor, “Induction-Generator-Based System Providing Regulated Voltage with Constant Frequency”, IEEE Transactions on Industry Applications-Brazil, 2000.