



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

MODELADO DE SISTEMAS COMPACTOS PARA MICRO GENERACIÓN
HIDROELÉCTRICA ECOLÓGICA, ACCESIBLES PARA ZONAS REMOTAS Y DE
BAJO COSTO E IMPACTO AMBIENTAL

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: FRANCISCO GABRIEL ARIAS ZAMBRANO
TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE, PhD.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Francisco Gabriel Arias Zambrano con documento de identificación N° 1105048142, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 16 de mayo del 2023

Atentamente,



Francisco Gabriel Arias Zambrano
1105048142

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Francisco Gabriel Arias Zambrano con documento de identificación N° 1105048142, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo académico “Modelado de sistemas compactos para micro generación hidroeléctrica ecológica, accesibles para zonas remotas y de bajo costo e impacto ambiental”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 16 de mayo del 2023

Atentamente,



Francisco Gabriel Arias Zambrano

1105048142

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **MODELADO DE SISTEMAS COMPACTOS PARA MICRO GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA ECOLÓGICA, ACCESIBLES PARA ZONAS REMOTAS Y DE BAJO COSTO E IMPACTO AMBIENTAL**, realizado por Francisco Gabriel Arias Zambrano con documento de identificación N°1105048142, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 16 de mayo del 2023

Atentamente,



FLAVIO ALFREDO
QUIZHPI PALOMEQUE

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, PhD.

0102257482

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por haberme dado un hogar donde desarrollarme y la educación de adquirir los valores que hoy me definen.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, y su planta de docentes. De manera especial al Ing. Flavio Quizhpi por la dirección en la realización de este trabajo, al Ing. José Aller y demás docentes de la institución que en todo momento ofrecieron su incondicional ayuda.

Agradezco a todas las personas que Dios ha puesto en mi camino y que han estado presentes con su gran mano de solidaridad, gracias amigos y compañeros.

¡Muchas gracias a todos!

Índice

ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
RESUMEN	1
ABSTRACT	1
1. Introducción	2
2. Sistemas asociados al modelo de microgeneración	3
2.1. Características en los sistemas hidráulicos	3
2.2. Acoplamiento del generador eléctrico asociado	3
2.3. Mecanismos de rectificación e inversión de potencia	3
2.4. Distribución mediante un enlace de bajo voltaje en CC.	4
2.5. Calidad de potencia entregada	4
2.6. Costos que implica la microgeneración	4
3. Modelamiento	5
3.1. Sistema hidráulico	5
3.2. Control de la velocidad en el eje de acoplamiento	6
3.3. Sistema convertidor de potencia y envío mediante enlace-LVDC	7
3.4. Consideraciones de calidad en el suministro	9
3.5. Costos asociados en la implementación de μGH	9
4. Simulaciones de modelos y resultados	10
4.1. Operación del sistema hidráulico	10
4.2. Conversión de potencia	11
4.3. Potencia de generación.	12
4.4. Pérdidas en el enlace LVDC	12
4.5. Calidad de potencia suministrada	13
4.6. Energía entregada y sensibilidad de micro generación hidroeléctrica	15
5. Conclusiones	15
6. Trabajos futuros	15
7. Referencias	16

Índice de figuras

1.	Modelamiento de un sistema de microgeneración hidroeléctrica.	2
2.	Esquema del filtro de paso bajo en configuración LCL.	4
3.	Incidencia de las componentes armónicas de alta frecuencia de un convertidor electrónico.	4
4.	Diseño de μGH en una geografía irregular de terreno.	5
5.	Bloques fundamentales en el estudio de la determinación del modelo de μGH	5
6.	Diagrama de bloques del sistema controlador PID de apertura de servo-válvula para la regulación de la velocidad en el eje acoplado.	6
7.	Diagrama de secuencia de las etapas del sistema de generación y conversión de potencia.	7
8.	Diagrama del controlador para la regulación de la tensión en la excitación del GSPS.	7
9.	Resultante de salida sinusoidal mediante la conmutación con la técnica SPWM.	8
10.	Técnica SPWM, armónicos individuales del proceso de modulación.	8
11.	Características del circuito hidráulico, parámetros del fluido en el inyector (Simulación en Fluid Flow).	10
12.	a. Flujo másico generado. b. Velocidad del fluido, evaluados en función de su diámetro.	11
13.	Curva del control de la velocidad en el eje de acoplamiento del GSPS, mediante apertura y cierre de la servo-válvula.	11
14.	Diagrama esquemático del sistema de convertidor de potencia, GSPS, puente rectificador trifásico, filtros de CC, enlace LVDC, puente inversor SPWM, filtros de CA (LCL), carga resistiva trifásica. (MATLAB-Simulink).	12
15.	Potencia activa y reactiva suministrada en bornes del GSPS en función de su ángulo de carga.	12
16.	Tensión e intensidad en el enlace LVDC, considerando 84 kW suministrados hacia la carga.	12
17.	Pérdidas de potencia debidas a efectos resistivos en los dos conductores del enlace LVDC.	13
18.	Potencia activa total suministrada a la carga de carácter resistiva.	13
19.	Tensión y corriente suministradas desde el terminal del inversor, sin carga conectada.	13
20.	Componentes individuales de distorsión armónica y THD de la señal de tensión suministrada por la red eléctrica en el terminal del inversor, sin carga conectada.	13
21.	Tensión y corriente suministradas desde el terminal del inversor, 84 kW se incluyen en la carga.	14
22.	Componentes individuales de distorsión armónica y THD de la señal de tensión suministrada por la red eléctrica en el terminal del inversor, 84 kW se incluyen en la carga.	14
23.	Densidad espectral de potencia en la tensión de suministro hacia la carga.	14

Índice de cuadros

1.	Parámetros del circuito hidráulico	10
2.	Parámetros en la generación y suministro	15

MODELADO DE SISTEMAS COMPACTOS PARA MICRO GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA ECOLÓGICA, ACCESIBLES PARA ZONAS REMOTAS Y DE BAJO COSTO E IMPACTO AMBIENTAL.

RESUMEN

Para reducir la escasez energética en sectores apartados, es necesario incrementar la disponibilidad de Energías a partir de fuentes renovables. Este trabajo de investigación desarrolla un modelo de micro generación hidroeléctrico (μGH) aislado de la red en un objeto de estudio propuesto, enviando la potencia hacia un sistema trifásico de carácter resistivo a través de un enlace en CC, para evaluar los parámetros de generación y distorsión armónica total (THD) en el suministro. El propósito del modelo hidráulico se enfoca en considerar los factores de eficiencia del circuito mediante los métodos de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams para estimar las pérdidas de carga en cada parte del sistema. La simulación del sistema hidráulico se realiza en el programa "Fluid Flow". Se elabora un controlador PID para la regulación de velocidad en el eje de acoplamiento y el control de regulación en la excitación del generador síncrono adecuando los parámetros de entrega de potencia de manera estable. La conversión a CC de la potencia generada, se realiza por medio de rectificación trifásica no controlada y se conecta al enlace de bajo voltaje en corriente continua (LVDC) de topología monopolar-simétrica, enviando en dos líneas hacia los terminales del inversor de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) para transferir la potencia en AC hacia la carga. Finalmente, se evalúa el costo de la Energía (COE) que implica esta topología. La simulación de los sistemas se realiza en el programa "MATLAB-Simulink".

Palabras clave: microgeneración hidroeléctrica, convertidores de potencia, distorsión armónica, costos de generación.

ABSTRACT

To reduce energy shortages in remote areas, it is necessary to increase the availability of energy from renewable sources. This research work develops an off-grid micro-hydro (μGH) generation model on a proposed study object, feeding the power into a three-phase resistive system through a DC link, to evaluate the generation parameters and total harmonic distortion (THD) in the supply. The objective of the hydraulic model focuses on considering the efficiency factors of the circuit using the Darcy-Weisbach and Hazen-Williams methods to determine the load losses in each part of this system. The simulation of the system is carried out in the "Fluid Flow" program. A PID controller for speed regulation on the coupling shaft and regulation control on the synchronous generator excitation is realised by stably adjusting the power delivery parameters. The generated power is converted to DC by means of three-phase uncontrolled rectification and is connected to the low voltage direct current link (CCBT) of single-pole-symmetrical topology, to send it in two lines, towards the terminals of the sinusoidal pulse width modulation (SPWM) inverter and transfer it in AC to the load. Finally, the cost of energy (COE) implied by this topology is evaluated. The simulation of the systems is carried out in the "MATLAB-Simulink" program.

Key words: micro-hydro power, power converters, harmonic distortion, generation costs.

1. Introducción

En la actualidad, la necesidad de Energía implica aspectos económicos, sociales y de calidad de vida de las personas. Se estima una tasa de crecimiento del consumo energético del 1 % en países desarrollados y del 5 % en países en vías de desarrollo [1], [2].

La Energía en sectores apartados en su mayoría proviene de la extensión de las redes de distribución. Sin embargo, el creciente interés de la micro generación hidráulica (μGH), puede estar asociado con el desarrollo de nuevas fuentes renovables, teniendo una gran aceptación en países con características montañosas que carecen de redes de suministro eléctrico con la capacidad de entregar Energía de forma estable sin la necesidad de grandes obras civiles, limitando el tamaño, capacidad hidráulica y evaluando la calidad de potencia entregada.

La integración de los sistemas de μGH , conjuntamente con el desarrollo continuo de los convertidores electrónicos de potencia y tecnologías para la distribución en corriente continua (CC), puede mejorar el enfoque para la entrega de Energía a distancias, debido al menor costo que implica la electrónica en la conversión y el envío mediante 2 líneas en CC sin el efecto de la reactancia de línea.

Sin embargo, la mayoría de los mecanismos utilizados en la conversión para el suministro en AC presentan ciertos aspectos de falta de aceptación en sus características que provocan un mal funcionamiento en la distribución y el consumo de Electricidad, debido a la cantidad de armónicos que se pueden generar [3], [4].

En Ingeniería Eléctrica uno de los grandes problemas que requieren un análisis detallado son las pérdidas energéticas originadas por esta clase de disturbios que pueden llegar afectar significativamente a los equipos eléctricos que lo consumen, cabe señalar que existen técnicas para obtener una mejor calidad en el suministro, una de ellas es identificando claramente el tipo de eventos con efectos de disturbio [5]. Teniendo la idea clara de este fenómeno se puede proporcionar una solución posible hacia el sistema de suministro que representaría en términos de ahorro, seguridad y prolongación de la vida útil a los dispositivos que pueden conectarse en el nodo común de distribución. Por tal motivo, el modelamiento de sistemas de μGH , mostrado en la Fig. 1, se enfoca en las características del sistema de conversión de potencia con los niveles de distorsión armónica total, acorde con los límites establecidos que se incluyen en las normativas vigentes para el suministro eléctrico.

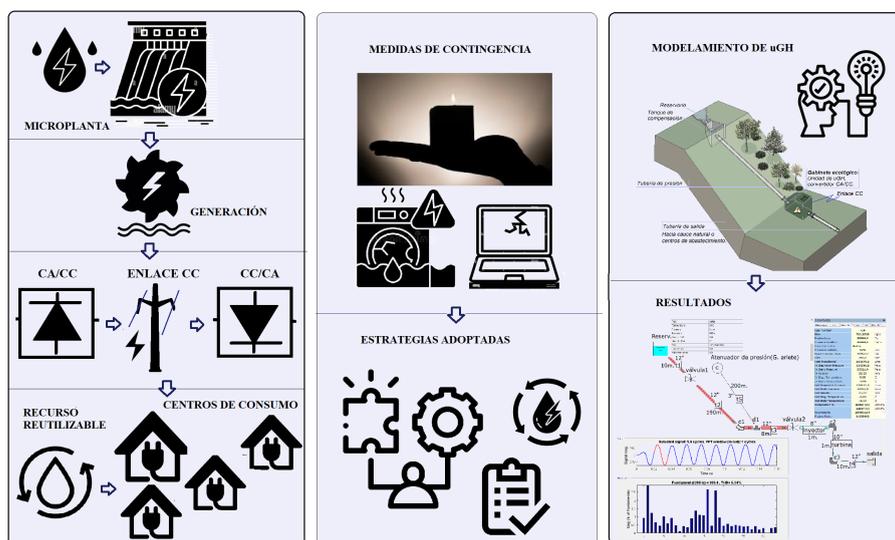


Figura 1: Modelamiento de un sistema de microgeneración hidroeléctrica.

2. Sistemas asociados al modelo de microgeneración

2.1. Características en los sistemas hidráulicos

En el transporte de un fluido hidráulico, las pérdidas se determinan por procesos no estacionarios y de acuerdo al camino de conducción [6]. En [7], se demuestra que debido a la aparición de rugosidades e irregularidades a lo largo de una tubería generando resistencia en el fluido que empeora con el tiempo. La estimación por métodos experimentales ha ayudado analizar este comportamiento. Sin embargo, no existe un método común para abordar el cálculo exacto de las pérdidas por fricción en cualquier circuito hidráulico de conducción. En la mayoría de los casos se adopta la ecuación de Darcy-Weisbach para obtener el factor de fricción en un determinado tramo o a su vez transformando a nuevas expresiones que incorporan los tipos de materiales utilizados, como se simplifica en las ecuaciones propuestas por Hazen-Williams. En [8], [9], se plantean varias razones que se pueden añadir en las pérdidas de eficiencia por fallas en los sistemas hidráulicos especialmente en los elementos asociados causados por corrosión, obstrucción mecánica y cavitación involucrando las características energéticas entregadas hacia la turbina.

2.2. Acoplamiento del generador eléctrico asociado

Entre las diferentes topologías en microgeneración hidráulica se encuentran asociadas las microturbinas acopladas al eje de un generador síncrono de polos magnéticos (GSPM). Las ventajas que reúne esta máquina pueden asociarse con su tamaño al poseer un devanado inducido frente al generador síncrono de

polos salientes (GSPS), siendo los dos de alta eficiencia. Sin embargo, una gran desventaja representa el debilitamiento de su campo magnético si se requieren mayores potencias de generación, estos tipos de generadores se pueden modelar según [10], mediante un equivalente de reactancia simplificada del GSPM, de igual forma en el GSPS se puede obtener su modelo equivalente por medio de un ensayo de respuesta de frecuencia (SSFR) [11], [12]. Este consiste en un oscilador de baja frecuencia sinusoidal y un amplificador de potencia empleado de acuerdo a su capacidad. Se pueden obtener los voltajes y corrientes en el campo y la armadura, y por medio de la transformación de Park, las impedancias en eje directo y cuadratura y las constantes de tiempo transitorias y sub-transitorias [13], [14].

2.3. Mecanismos de rectificación e inversión de potencia

La mayoría de las topologías utilizadas en la rectificación de alta potencia se requieren dos transformadores en configuración estrella-estrella y estrella-triángulo para una rectificación de bajo rizado (doce pulsos), implicando un gran tamaño y robustez en el sistema. En [15], se propone un convertidor CA/CC mediante un sistema electrónico con un transformador chopper para desplazar 30° en las fases siendo posible una rectificación de este tipo. Esto reduce en gran medida el tamaño del sistema convertidor, pero puede resultar afectada la vida útil de los interruptores de potencia al estar expuestos a extensos y variables ciclos de trabajo demandados por el proceso de generación.

Varios autores se enfocan en los reactivos generados en la conversión CC/CA. En [16], se aprovecha la capacitancia para agregar potencia reactiva, utilizando un convertidor de punto neutro fijado (NPC). En [17], se añade antes del inversor

un convertidor reductor/elevador para controlar reactivos entregados hacia la red. En [18], se muestra un modelo de inversor conectado a la red que actúa a la vez como filtro de potencia activo shunt. En [19], se presentan dos métodos de inyección de potencia activa en interacción con la carga, en el intervalo de tiempo de la demanda máxima y cuando supera el umbral predefinido. En [20], se muestra la tipología de inversores SPWM y la variación de sus parámetros en el filtrado para reducir gran cantidad de armónicos generados por conmutación de los interruptores IGBT, estos filtros pueden ser: L, C, LC y LCL. En [21], se demuestra que la configuración del filtro LCL, presenta mejor desacoplamiento entre la parte inversora y la red de impedancia que implica con la respuesta en la reducción de componentes armónicos generados, esta configuración se muestra en la Fig. 2.

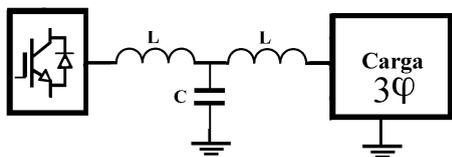


Figura 2: Esquema del filtro de paso bajo en configuración LCL.

2.4. Distribución mediante un enlace de bajo voltaje en CC.

Varios artículos desarrollan la posibilidad del envío mediante un enlace HVDC para trayectorias largas. En [22], [23], se centran en la aplicación de los sistemas de distribución en MVDC y LVDC, señalando las ventajas en términos de optimización de transferencia de Energía y la detección de fallas en los sistemas eléctricos de CC en función de la característica de impedancia. Este método se basa en una comparación de impedancia de sus especificaciones frente a las de sus módulos individuales.

2.5. Calidad de potencia entregada

La interacción de los mecanismos de conversión DC-AC mediante conmutación electrónica frente a los sistemas eléctricos de alta demanda puede generar variaciones en los parámetros de tensión, frecuencia, y distorsión en el sistema eléctrico. En la Fig 3, se muestra la incidencia de las armónicas de sobre la señal en la tensión alterna trifásica.

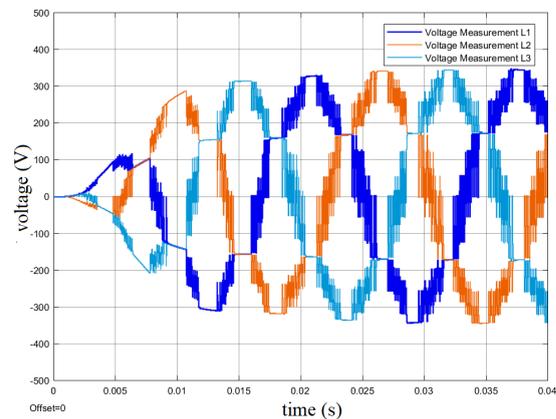


Figura 3: Incidencia de las componentes armónicas de alta frecuencia de un convertidor electrónico.

Las componentes armónicas generadas de alta frecuencia generan disturbios sobre la frecuencia fundamental, siendo la principal causa de pérdidas de Energía, y daños en equipos electrónicos, capacitores de corrección del factor de potencia y calentamiento de las máquinas eléctricas [24].

2.6. Costos que implica la microgeneración

En microgeneración convencional, el (COE), se determina basado al consumo de fuel oil, carbón o gas, para producir 1 kW.h en Electricidad. Según [25], la μGH tiene la característica de un bajo costo de generación, al no poseer un combustible principal de operación. Además, los costos de inversión que se incurrirán son bastante competitivos respecto a otro

tipo de generación eléctrica de igual capacidad [26].

En relación a otros sistemas renovables, se destaca la generación solar fotovoltaica. El autor [25], demuestra un costo de generación de 0,147 US\$/kWh para 1 kWp de capacidad. Por otro lado, varios autores sugieren los sistemas de generación híbrida, mediante la asociación de una micro hidroeléctrica y Energía fotovoltaica en un sistema fuera de la red. Los autores [27], realizan un estudio en el área rural (oeste de China). Este sistema híbrido puede suministrar Energía eléctrica a un costo de 0.201 US\$/kWh. siendo viable económicamente en un tiempo de 15 años de vida útil.

3. Modelamiento

Se desarrolla una propuesta de μGH presentada en la Fig. 4.

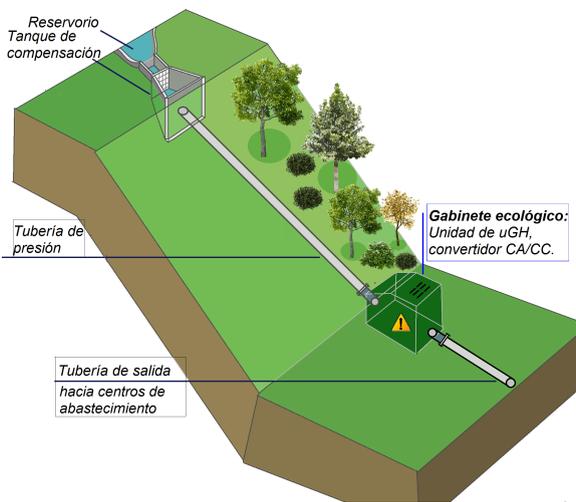


Figura 4: Diseño de μGH en una geografía irregular de terreno.

Se opta por considerar tres fases metodológicas:

La primera, a través de definiciones en relación a los factores más influyentes de la μGH expuestos por los autores en las literaturas. En segundo lugar, de acuerdo

a criterios técnicos clasificados como relevantes en la realización de cada etapa del modelo. En la tercera fase se desarrolla el modelado, la simulación y el proceso de evaluación en un objeto de estudio propuesto incluyendo la determinación del costo que implica la implementación del sistema de μGH .

Se presenta una visión general dividido en dos bloques fundamentales mostrados en la Fig. 5.

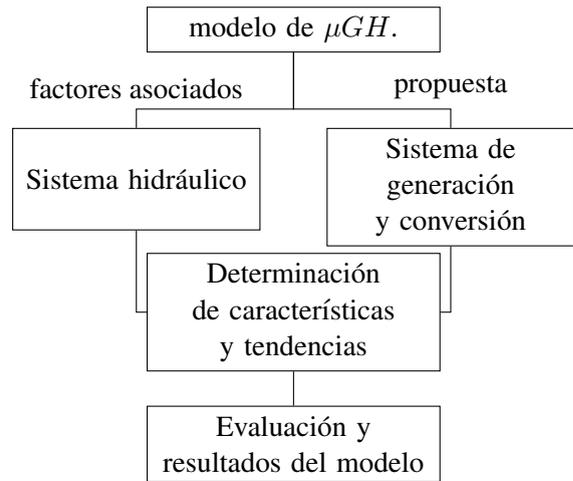


Figura 5: Bloques fundamentales en el estudio de la determinación del modelo de μGH .

3.1. Sistema hidráulico

$$\frac{U_1^2}{2g} + \frac{\rho_1}{\lambda} + C_1 \cdot \frac{U_2^2}{2g} + \frac{\rho_2}{\lambda} + C_2 = constante \quad (1)$$

Donde:

λ : es el factor de fricción Darcy [*adim*].

U : es la velocidad del fluido en [*m/s*].

g : es la aceleración de la gravedad en [*m/s²*].

Para el caso de un fluido incompresible con peso específico $\rho_1 = \rho_2$. Las pérdidas de carga en la sección hidráulica pueden estimarse por Darcy-Weisbach mediante:

$$h_\lambda = \lambda \cdot \frac{L \cdot U^2}{2g \cdot D_i} \quad (2)$$

Donde:

λ : es el factor de fricción Darcy [*adim*].

L : es la longitud del tramo en [m].

D_i : es el diámetro interno en [m].

El sistema hidráulico se compone de la red de circuito hidráulico y del conjunto de componentes que se adaptan en el mismo. La turbina forma parte de un componente adicional y se debe considerar de acción o reacción de acuerdo a la altura neta de este sistema.

Para la determinación del potencial hidro-energético se construye un algoritmo de determinación las pérdidas por fricción a lo largo del sistema hidráulico.

Algorithm 1 Estimación de pérdidas de carga

```

0: Pérdidas de carga ( $h\lambda$ )
0:    $SH \subset Q, U, \lambda$ 
0:    $K_L \leftarrow \sum_{i=1}^n K$  {Constante de
    accesorios individuales}
0:    $L_{eq} \leftarrow K_L \cdot D_i$  {Longitud equivalente}
0:    $h_L \leftarrow \frac{U^2}{2g}(K_L)$  {pérdidas por fricción en
    accesorios}
0:    $L_{total} \leftarrow L_{tubería} + L_{acces}$ 
0:   while  $\lambda \neq \lambda_{asumido}$  do
0:      $U \leftarrow \sqrt{\frac{2g \cdot (h_1 - h_2)}{1 + \frac{L_{total} \cdot \lambda}{D}}}$  [m/s]
0:      $Re \leftarrow \frac{\rho \cdot U \cdot D_i}{\mu}$  {no. Reynolds}
0:      $\lambda \leftarrow \frac{1,325}{-ln[\frac{0,0015}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}]}$  {fricción
    calculada}
0:      $\lambda_{asumido} \leftarrow \lambda$ 
0:   end while
0:    $Q \leftarrow \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot U}{4}$  {Gasto generado}
0:    $h\lambda \leftarrow \lambda \cdot \frac{0,08263 \cdot Q^2 \cdot L}{D_i^5}$  {Pérdidas de carga
    del circuito}
=0

```

El algoritmo calcula la constante de accesorios individuales, la longitud equivalente y las pérdidas por fricción en accesorios. La optimización de búsqueda por iteraciones en el método de Newton Raphson permite encontrar el factor de

fricción encontrado del sistema. Esta búsqueda mejora el criterio de cálculo del flujo másico o gasto Q y las pérdidas de carga originadas en determinado circuito hidráulico. También este cálculo se puede emplear para estimar la altura neta aprovechable.

3.2. Control de la velocidad en el eje de acoplamiento

El mecanismo de regulación de velocidad en el eje turbina-generator, se realiza por medio de un controlador de velocidad Proporcional Integral Derivativo (PID). La velocidad angular de referencia ω_g es comparada con la velocidad del rotor, por medio de este controlador se ejecuta la acción del actuador para la apertura o cierre en pasos de la servo-válvula [28], [29].

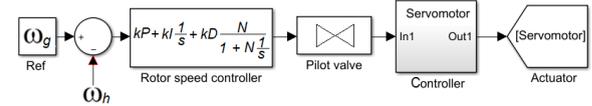


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema controlador PID de apertura de servo-válvula para la regulación de la velocidad en el eje acoplado.

En la Fig. 6, se muestra el diagrama de bloques del controlador de regulación de velocidad del eje de par mecánico acoplado al rotor donde: kP es la constante proporcional, kD es la constante derivativa, kI es la constante integral, N es el tiempo proporcional en el controlador.

3.3. Sistema convertidor de potencia y envío mediante enlace-LVDC

Este sistema tiene varias etapas en el modelo: acoplamiento de turbina-generador sincrónico, convertidores

electrónicos CA/CC, CC/CA y enlace LVDC, como se presenta en la Fig. 7.

La potencia hidráulica está dada por transferencia de par mecánico y velocidad angular hacia el eje de acoplamiento del GSPS.

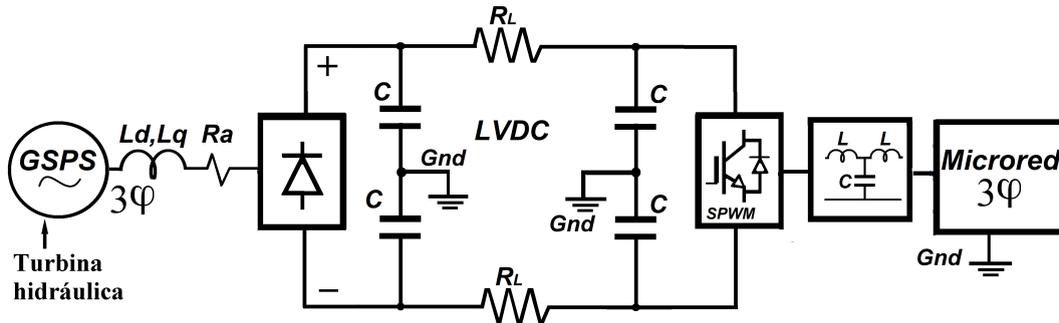


Figura 7: Diagrama de secuencia de las etapas del sistema de generación y conversión de potencia.

Para mayor estabilidad en la generación se incorpora un sistema de control de la tensión de excitación mostrado en la Fig. 8, que consiste en un sistema de primer orden de compensación y regulación del excitador del GSPS consiguiendo un punto adecuado de entrega de potencia activa con el ajuste automático de su ángulo de carga.

Los reactivos entregados $Q[kVAr]$ se determinan mediante:

$$Q = \frac{E_f \cdot V_f}{X_d} \cdot \cos(\phi) + \frac{V_f^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\phi) \quad (4)$$

Where:

E_f : es la fuerza electromotriz en [V].

V_f : es la tensión en bornes en [V].

X_d : es la reactancia en el eje directo en [Ω].

X_q : es la reactancia en el eje cuadratura en [Ω].

ϕ : es el ángulo de carga en [grados].

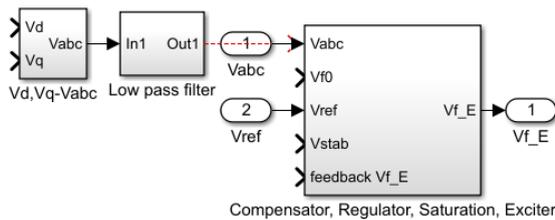


Figura 8: Diagrama del controlador para la regulación de la tensión en la excitación del GSPS.

Para la determinación de la potencia de generación se utilizan las siguientes expresiones: Potencia activa $P[kW]$ entregada por el GSPS, se puede calcular como:

$$P = \frac{E_f \cdot V_f}{X_d} \cdot \sin(\phi) + \frac{V_f^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2\phi) \quad (3)$$

La rectificación no controlada de 6 pulsos se conforma por el puente triásico conectado en bornes del generador. Este mecanismo de rectificación incluye filtros capacitivos para eliminar el efecto del pulsado resultante con capacidades de acuerdo a la demanda de potencia. En efecto, para μGH cuya potencia límite es 100 kW, se considera aceptable este proceso de rectificación debido a que las corrientes circulantes no representan un riesgo para los sistemas.

En la rectificación no controlada de 6 pulsos, la tensión en CC se puede definir como:

$$V_{oDC} = 2,34125 \cdot V_{fnRMS} \quad (5)$$

Donde:

V_{fn} : es la tensión de fase y neutro en [V].

La transferencia de potencia rectificada a través del enlace LVDC, tipo monopolar simétrico se caracteriza por tener tensiones y corrientes simétricas en ambas direcciones. Las pérdidas de potencia se basan al efecto puramente resistivo, una característica que disminuye la capacidad de entrega de potencia, pudiendo evaluarse mediante la ley de Joule como:

$$P_{Loss} = i^2 \cdot R_L \quad (6)$$

Donde:

i : es la corriente en el enlace en [A].

R_L : es la resistencia en el enlace en [Ω].

La conmutación de interruptores IGBT, en la técnica SPWM suministra tensión y corriente en CA constante hacia la impedancia conectada en la salida. En la Fig. 9, se presenta esta técnica, como resultado al comparar una señal moduladora $m(t)$ frente a una portadora $c(t)$ de alta frecuencia, dando lugar a un ancho de pulso constante en un ciclo variable para cada período [30]. La Fig. 10, muestra que esta técnica realiza una inversión con los armónicos más alejados de la frecuencia fundamental, aceptando múltiples configuraciones de filtros paso bajo.

En la técnica SPWM la tensión efectiva suministrada, se obtiene mediante:

$$V_{oRMS} = V_s \sqrt{\sum_{p=1}^p \frac{\delta_m}{\pi}} \quad (7)$$

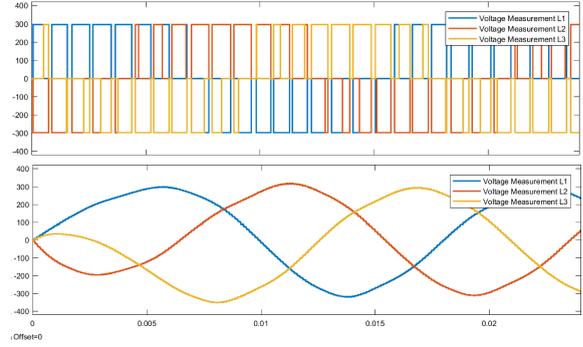


Figura 9: Resultante de salida sinusoidal mediante la conmutación con la técnica SPWM.

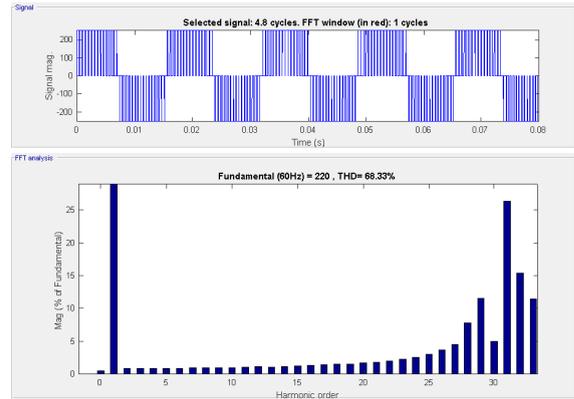


Figura 10: Técnica SPWM, armónicos individuales del proceso de modulación.

Donde:

V_s : es la tensión suministrada en [V].

δ_m : es el ángulo de modulación en [grados].

Se establece la frecuencia de la portadora $c(t)$ de 25 kHz (acorde a puntos de operación del IGBT), mientras que la moduladora $m(t)$ es sinusoidal de 60 Hz, con un control variable de su relación.

La estrategia de variar la amplitud entre la señal moduladora y la señal portadora puede determinar la tensión de salida del inversor. Sin embargo, si esta relación entre modulador y portador incrementa a más de 1, se puede considerar una sobre modulación produciendo mayor incidencia de armónicos y como resultado mayores pérdidas por efecto armónico. Se

opta por trabajar con valores entre 0,6 y 1,2.

3.4. Consideraciones de calidad en el suministro

El proceso electrónico de rectificación e inversión con la técnica SPWM, permite controlar los parámetros de suministro de tensión y corriente, incluyendo la distorsión armónica generada por las características del sistema. El THD se puede relacionar entre la suma del valor cuadrático medio de los armónicos individuales y el valor del componente fundamental.

La calidad de suministro en términos de THD resultante del proceso es definido por:

$$THD_V = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}{V_1} \cdot 100 \% \quad (8)$$

Donde:

V_h : es la componente individual en [V].

V_1 : es la componente fundamental en [V].

Las normativas internacionales EN50160, IEEE 519-2014, En calidad de suministro, establecen como límites para sistemas de bajo voltaje, los niveles permitidos en tensión del +10% del valor nominal y en distorsión los componentes individuales del 5% y THD de un 8%, para garantizar la calidad de suministro a nivel de distribución [4].

3.5. Costos asociados en la implementación de μGH

Los costos de implementación de un sistema de μGH , se basan específicamente en la inversión inicial que contempla los gastos en red de circuito hidráulico, el conjunto generador sincrónico, gastos por operación y mantenimiento y el factor de capacidad para este tipo de generación, La viabilidad de este tipo de inversión puede

ser calculado utilizando la ecuación del valor actual neto (VAN), descrito en la siguiente expresión:

$$COE = \frac{d \cdot (1+d)^N}{-1 + (1+d)^N} + C_{O\&M} \cdot \frac{C_{INV}}{D_{A\tilde{N}O} \cdot F_p} \quad (9)$$

Donde:

d : es la tasa de descuento en [%].

N : es el número de años.

$C_{O\&M}$: es el costo de oper. y manten. en [%].

C_{INV} : es el costo de inversión en [US\$/kW].

$D_{A\tilde{N}O}$: es el número de días al año.

F_p : es el factor de capacidad en [%].

Se considera un margen de costo por avería dentro de un periodo de 15 años de vida útil de la micro planta, los costos de inversión generados en base a la plataforma de contratación pública de Ecuador, incluyendo el envío se estiman como: Para el conjunto sistema hidráulico-turbina, generador y los accesorios es de 1226,17 US\$/kW, El equipamiento electrónico para la conversión representa 426,38 US\$/kW, y el costo en tendido eléctrico del enlace LVDC de 574,92 US\$/kW, teniendo un costo total de inversión de 2227,47 US\$/kW. (Este costo representa al evaluar la construcción de 5 kW de μGH).

4. Simulaciones de modelos y resultados

4.1. Operación del sistema hidráulico

Como ejemplo de esta propuesta, se ha seleccionado un objeto de estudio con

las siguientes características: La longitud del circuito hidráulico es de 220 m y su altura neta de 100 m. La Fig. 11, muestra los elementos incorporados en el sistema, además se evalúan algunos parámetros en el tramo del inyector.

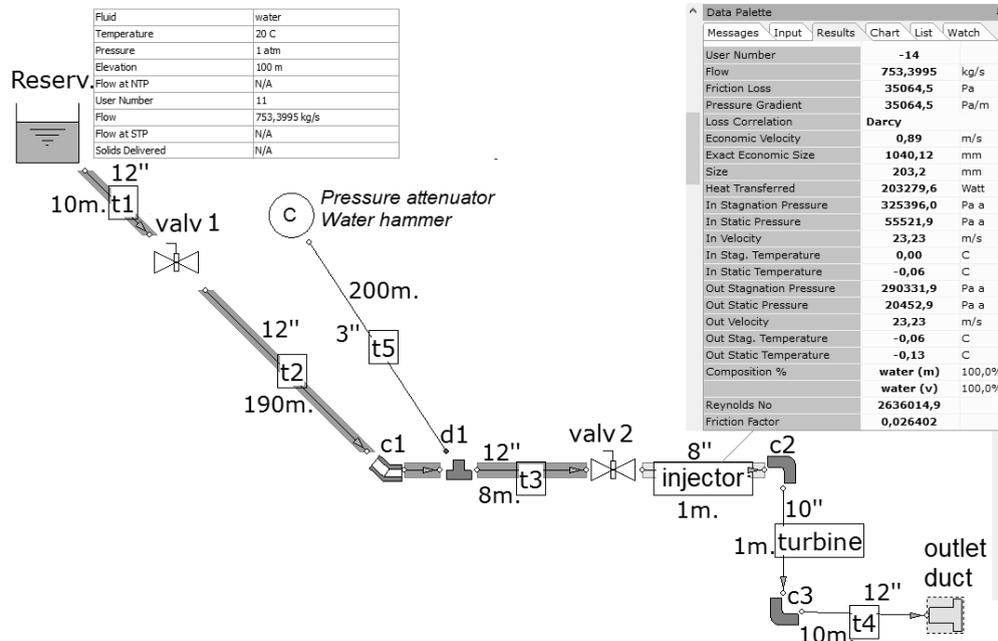


Figura 11: Características del circuito hidráulico, parámetros del fluido en el inyector (Simulación en Fluid Flow).

Cuadro 1: Parámetros del circuito hidráulico

	Longitud (m)	Velocidad del fluido (m/s)	K	Pérdidas por Fricción (kPa)
t1	10,00	12,00	0,0119	30,17
t2	190,00	11,98	0,0123	592,57
t3	8,00	11,98	0,0139	28,34
t4	10	11,98	0,0800	26,98
inyector	1,00	23,23	0,0264	35,05
c1	-	11,98	0,66	47,58
c2	-	14,87	0,47	125,81
c3	-	11,98	0,46	51,26

Los parámetros son evaluados para cada componente del sistema hidráulico se especifican de acuerdo al Cuadro 1.

Se genera a través de la turbina hidráulica un flujo másico de 753 kg/s, con una presión de estancamiento del fluido en la salida de los inyectores de 325 kPa,

transfiriendo en potencia hidráulica 203,2 kW. Se muestra en la Fig. 12, una relación de acuerdo a los factores de fricción obtenidos mediante iteraciones numéricas por el método de Newton Raphson.

Se presenta en a. (izquierda), el flujo generado, en b.(derecha), la velocidad del fluido evaluados para cada diámetro utilizado en μGH .

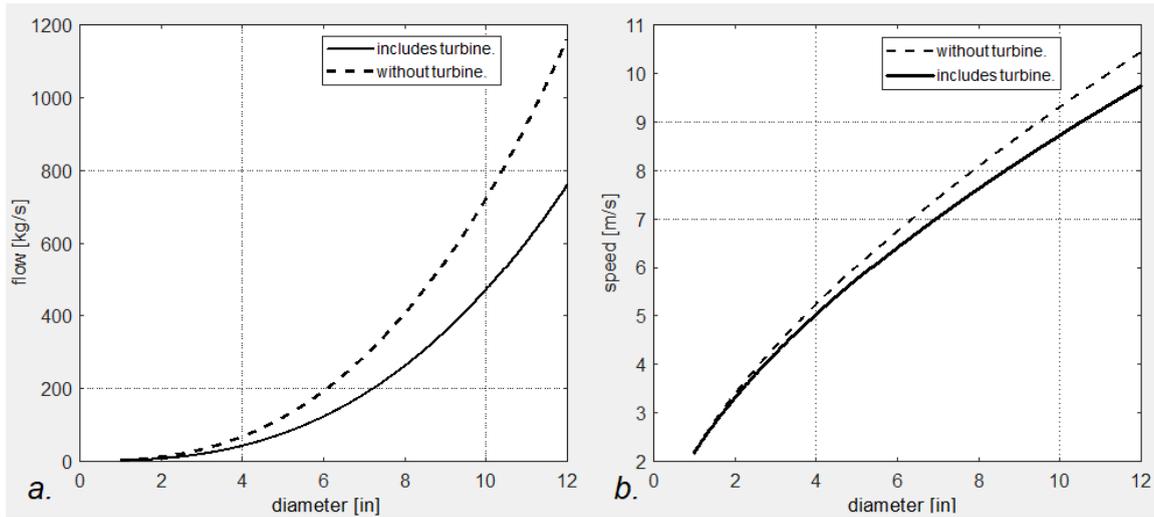


Figura 12: a. Flujo másico generado. b. Velocidad del fluido, evaluados en función de su diámetro.

El principal componente de pérdida por fricción corresponde a la longitud del tramo (T2), resultando una caída de presión de 592.97 kPa para transportar un flujo másico de 753.40 kg/s.

va incrementando en pasos de apertura de la servo-válvula acoplada al sistema hidráulico. Este controlador de velocidad sintonizado a 900 rpm, la frecuencia de generación se establece en 60 Hz, Si el caso es de obviar este tipo de control la velocidad tiene una característica de variación e incremento, resultando una frecuencia variable.

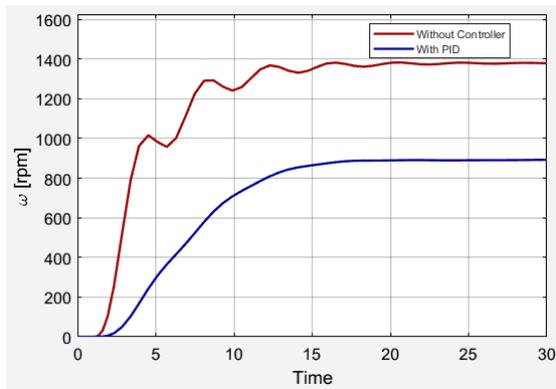


Figura 13: Curva del control de la velocidad en el eje de acoplamiento del GSPS, mediante apertura y cierre de la servo-válvula.

En el acoplamiento turbina-generador, el par mecánico-velocidad se establece según la Fig. 13, la acción del controlador PID,

4.2. Conversión de potencia

Las etapas de conversión de energía se resumen en bloques desde la máquina síncrona, el sistema de rectificación, el enlace LVDC y el inversor trifásico SPWM a la red.

En la Fig. 14 se presenta circuito esquemático de conversión, estructurada en Matlab-SIMULINK. La unidad generadora propuesta es de 100 kW, 900 rpm y tensión de línea de 380 V

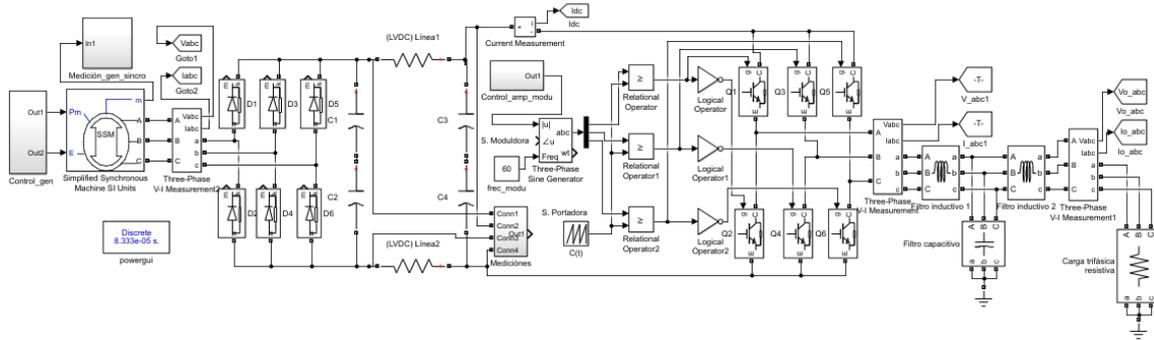


Figura 14: Diagrama esquemático del sistema de convertidor de potencia, GSPS, puente rectificador trifásico, filtros de CC, enlace LVDC, puente inversor SPWM, filtros de CA (LCL), carga resistiva trifásica. (MATLAB-Simulink).

4.3. Potencia de generación.

La potencia generada en bornes del generador síncrono, considerando plena carga conectada se establece en 103,7 kW y 8,6 kVar en reactivos como se muestra en la Fig. 15.

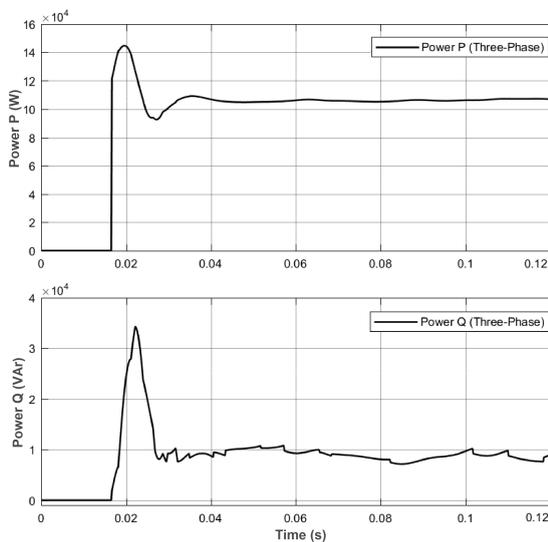


Figura 15: Potencia activa y reactiva suministrada en bornes del GSPS en función de su ángulo de carga.

Algunas razones de variación de la potencia están íntimamente vinculadas con el comportamiento del sistema rectificador.

4.4. Pérdidas en el enlace LVDC

Según el tipo de rectificación utilizado, la corriente en el enlace LVDC a plena carga presenta fluctuaciones entre 160-220 A de la corriente nominal por las características del filtrado AC y la demanda exigida por la maniobra de los interruptores automáticos IGBT mostrado en la Fig. 16.

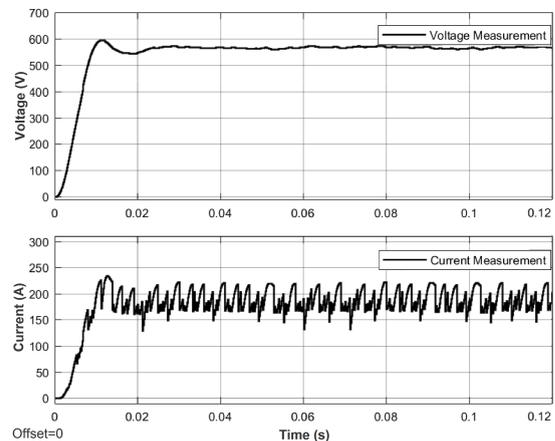


Figura 16: Tensión e intensidad en el enlace LVDC, considerando 84 kW suministrados hacia la carga.

Se considera un enlace LVDC de 1 km de longitud hasta el centro de carga, con un conductor Ostridge (300 MCM), cuya resistencia eléctrica a 20 °C es de 0,1867 Ω /Km, la pérdida de potencia en las 2 líneas del enlace oscilan en 13 kW presentados en la Fig. 17 y 84,21 kW, que se establecen en

la carga de característica resistiva como se muestra en la Fig. 18.

De acuerdo a la potencia entregada por el conjunto, considerando un suministro permanente en un periodo de un año, con un factor de planta unitario, se puede estimar la Energía total de 737.68 MW.h-año.

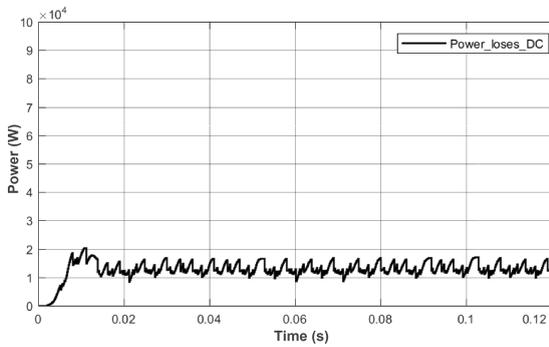


Figura 17: Pérdidas de potencia debidas a efectos resistivos en los dos conductores del enlace LVDC.

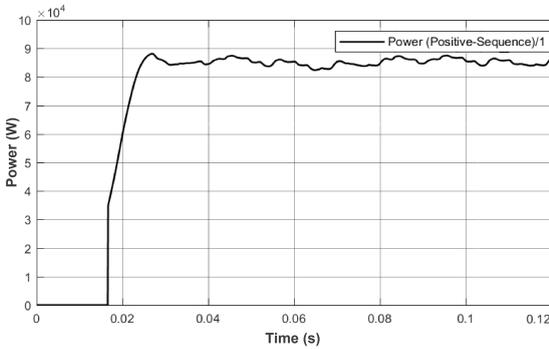


Figura 18: Potencia activa total suministrada a la carga de carácter resistiva.

4.5. Calidad de potencia suministrada

Para el objeto de estudio, sin carga conectada la tensión eficaz suministrada en los terminales del inversor es de 226,3 V, como se muestra en la Fig. 19. Los índices de distorsión armónica individual de la señal de tensión se muestran en la Fig. 20, correspondientes al orden 5 y 13 con

1 %, y al orden 16 y 18 con 2,51 %, que describe un THD = 4,34 %, considerado aceptable para distribución residencial de baja tensión, se muestra el espectro de los armónicos existentes en un barrido de frecuencia hasta 2 kHz (armónico número 33).

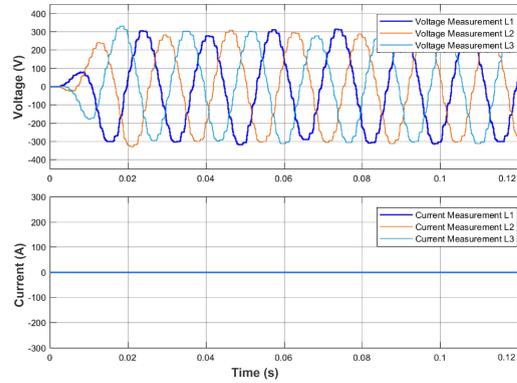


Figura 19: Tensión y corriente suministradas desde el terminal del inversor, sin carga conectada.

La configuración incrementando el valor del filtro LCL respondería a una mayor mitigación de armónicos de orden superior. Sin embargo, la maniobra de incrementar el filtro capacitivo puede resultar en mayores pérdidas de potencia por mayor mitigación de armónicas generadas.

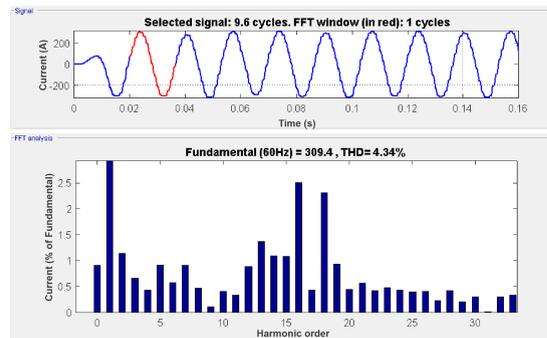


Figura 20: Componentes individuales de distorsión armónica y THD de la señal de tensión suministrada por la red eléctrica en el terminal del inversor, sin carga conectada.

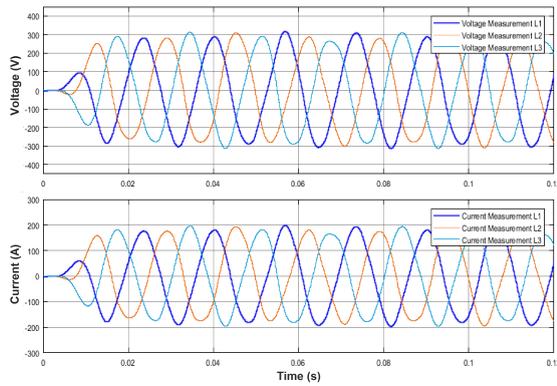


Figura 21: Tensión y corriente suministradas desde el terminal del inversor, 84 kW se incluyen en la carga.

Evaluando una carga sostenida a la tensión en fase de 217,57 V se tiene una corriente de fase de 138,21 A. La magnitud, forma y características del voltaje así como la corriente en la carga trifásica se muestran en la Fig. 21.

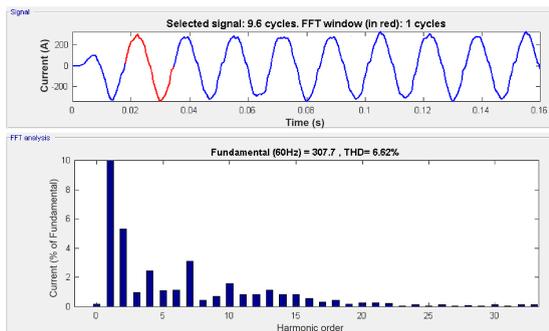


Figura 22: Componentes individuales de distorsión armónica y THD de la señal de tensión suministrada por la red eléctrica en el terminal del inversor, 84 kW se incluyen en la carga.

En la Fig. 22, se presenta la magnitud de las principales componentes de distorsión armónica individual en tensión y corriente provenientes de los ciclos de conmutación y filtrado siendo de orden 2, 4, 7 y

10 con una incidencia menor al 4%, en las componentes pares no representa un impacto debido a la simetría de la señal sinusoidal, en la componente de tercer orden (420 Hz), se observa notablemente el disturbio generado sobre las crestas de la tensión suministrada del convertidor SPWM.

Al aproximarse al límite de potencia de 84 kW en generación, el armónico de 5° posee el 1,05 % y 7° orden con el 3 %.

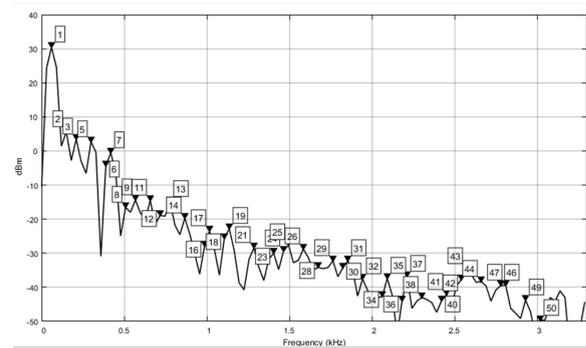


Figura 23: Densidad espectral de potencia en la tensión de suministro hacia la carga.

En la Fig. 23 se muestra el análisis de densidad espectral de la tensión de suministro hacia la carga conectada, en un barrido hasta el armónico número 50 (3 kHz), una de las características es la existencia de sub-armónicas y armónicos de bajo orden de carácter transitorios en el arranque del inversor y mayores al séptimo orden con una magnitud inferior a 1 dBm, con una media de -31,84 dBm.

Finalmente entre otros parámetros del proceso de generación y suministro de potencia del modelo, se valora las principales variables encontradas sin carga conectada (SC) y con carga conectada (PC), mostrados en la Tabla 2.

Cuadro 2: Parámetros en la generación y suministro

	Gen PC	Gen. SC SC	LVDC PC	Sum. PC PC	Sum. SC SC
P(kW)	107,26	16,93	87,37	84,21	-
Q(kVAR)	10,62	5,45	-	-	-
Tens. (V)	221,17	223,23	+292,54	217,57	218,78
Corr. (A)	146,52	11,47	+149,33	138,21	-
FP	0,995	0,995	1	1	1
THD (%)	2,14	1,11	-	5,62	4,34

4.6. Energía entregada y sensibilidad de micro generación hidroeléctrica

De acuerdo a la capacidad de potencia útil del modelo de μGH , se puede estimar 735,84 MW.h-año de Energía entregada al año equivalente a 63,27 toneladas equivalentes de petróleo (TEP), en caso de utilizar generadores térmicos consiguiendo similares resultados.

En un periodo de evaluación de $N = 15$ años en su vida útil, con una tasa de descuento de la generación hidráulica del $d = 5\%$, un costo de operación y mantenimiento $C_{O\&M} = 2\%$ llevado a un costo de inversión de $C_{INV} = 2227,47$ US\$/kW-instalado y un factor de planta de $F_p = 30\%$, se tiene un COE de 0,1133 US\$/kW.h, este valor se considera aceptable para la capacidad prevista de suministro, resultando más económico en relación a otro tipo de generación como se describen los costos señalados en la primera sección.

5. Conclusiones

El principal factor de pérdida de carga en el circuito hidráulico propuesto es por fricción en el tramo de tubería T2 con el diámetro establecido. Esto genera rozamiento del fluido en la superficie interior de la tubería. En longitudes mayores, se debe considerar diámetros mayores para reducir este efecto. Otros componentes que aumentan la pérdida de carga están relacionados con el codo de

45°, las válvulas y las uniones.

Considerando un enlace LVDC de corta distancia en el caso de estudio propuesto, las pérdidas debidas al efecto resistivo de las líneas son bajas y pueden tolerarse en bajas demandas. El comportamiento de la potencia máxima entregada a la salida del convertidor SPWM muestra pequeñas oscilaciones debidas a pulsos de rectificación no controlados. Una configuración más robusta del filtro LCL respondería a una mitigación de armónicos de orden superior, generando mayores pérdidas de potencia suministrada por efecto armónico. El ajuste correcto de esta relación mejora este comportamiento. Este modelo fue probado en escenarios con y sin carga resistiva conectada, mostrando que el THD resultante aumenta con el requerimiento de la demanda.

6. Trabajos futuros

Continuando posteriormente con el enfoque investigativo de este trabajo, es necesario implementar un mecanismo de control de la potencia máxima entregada por el conjunto tomando en consideración los factores de distorsión armónica del proceso de conversión CC/CA y los reactivos Q generados. Esto puede ayudar a mejorar el punto óptimo de capacidad de entrega de potencia y mantener estables los niveles de tensión y corriente garantizando

el suministro eléctrico adecuado entregado a los centros de carga. Además, se puede realizar un análisis con carga no lineal, en especial con característica inductiva, siendo el caso de la conexión de motores eléctricos y otros dispositivos conectados a la red.

Referencias

- [1] G. T. F. Vinicius, C. Silvia, D. Aleksandar, B. Massimo, and M. Marco, "Rural electrification planning based on graph theory and geospatial data: A realistic topology oriented approach," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 28, p. 100525, dec 2021.
- [2] C. Acikgoz, "Renewable energy education in turkey," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 608–611, feb 2011.
- [3] V. Dwivedi and D. Singh, "Electric power quality monitoring (PQM) using virtual instrumentation," in *SPEEDAM 2010*. IEEE, jun 2010.
- [4] IEEE, "IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems," 2014.
- [5] N. B. H. Youssef and K. Al-Haddad, "Application of the new quasi-linear control theory to the AC current shaping and DC voltage regulation of a three-phase boost-type AC/DC vienna converter under very severe operating conditions," in *EUROCON 2007 - The International Conference on Computer as a Tool*. IEEE, 2007.
- [6] V. Kovalchuk and T. Korenkova, "The assessment of the efficiency of a pumping plant with a variable-frequency electric drive at the change of the hydraulic system parameters," in *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. IEEE, sep 2019.
- [7] N. Adamov, "A modern approach to improve the effectiveness of logistics management of water flows of transboundary areas of russia," vol. 40, no. 5, October 2019. [Online]. Available: <https://www.revistaespacios.com/a19v40n37/a19v40n37p08.pdf>
- [8] M. Z. T. Korenkova, V. Kovalchuk, *2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) : conference proceedings : June 2-6, 2014 Kyiv, Ukraine*. Piscataway, N.J: IEEE, 2014, no. 145-147.
- [9] F. L. Quilumba, L. K. Lee, W.-J. Lee, and A. Harding, "Improving hydraulic system energy efficiency with high-performance hydraulic fluids," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 2, pp. 1313–1321, mar 2014.
- [10] J. M. Aller, J. A. Restrepo, J. C. Viola, and J. R. Mayor, "Simplified voltage behind reactance model for the six-phase open-end salient pole PMSM," in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, aug 2020.
- [11] IEEE, "Guide for test procedures for synchronous machines part I Acceptance and performance testing part II Test procedures and parameter determination for dynamic analysis," 2010.
- [12] E. da Costa Bortoni and J. Jardini, "A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines," *IEEE Transactions on*

- Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 687–691, dec 2004.
- [13] J. J. Grainger, *Analisis de Sistemas de Potencia*. MC Graw Hill, 1996.
- [14] P. M. Anderson, *Power system control and stability*. IEEE Press, 1994.
- [15] F. Meng, Z. Man, and L. Gao, “A 12-pulse rectifier based on power electronic phase-shifting transformer,” in *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. IEEE, nov 2018.
- [16] M. Fajardo, J. Viola, J. M. Aller, and F. Quizhpi, “DC-link voltages balance method for single-phase NPC inverter operating with reactive power compensation,” in *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. IEEE, dec 2019.
- [17] G.-H. Min, K.-H. Lee, J.-I. Ha, and M. H. Kim, “Design and control of single-phase grid-connected photovoltaic microinverter with reactive power support capability,” in *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*. IEEE, may 2018.
- [18] J. Viola, M. Fajardo, J. M. Aller, J. Restrepo, and F. Quizhpi, “Grid connected inverter with active power filter capabilities for two-phase systems,” in *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. IEEE, oct 2018.
- [19] M. Fajardo, J. Viola, J. M. Aller, and F. Quizhpi, “Use of grid connected inverters in reduction of electric demand peak in residential installations,” in *2018 IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting (EPIM)*. IEEE, nov 2018.
- [20] G. Neha and B. Banakara, “Power quality enhancement in smart grid by synchronizing SPWM inverter and LC filter,” in *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. IEEE, may 2017.
- [21] M. Maghraby, H. A. Ashour, and A. A. H. Eldin, “Analysis and implementation of discrete SPWM signals for grid-connected inverter with LCL filter,” in *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. IEEE, dec 2017.
- [22] K. Cheng, “Overview of the dc power conversion and distribution,” *Asian Power Electronics*, vol. 2, pp. 75,76, Oct. 2008.
- [23] X. Xiao, W. Su, J. Guo, C. Zhang, Q. Xiong, Z. Di, and S. Ji, “Analysis of arc characteristics and fault detection in low voltage DC system,” in *2021 3rd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES)*. IEEE, sep 2021.
- [24] “IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying non-sinusoidal load currents.”
- [25] R. Syahputra and I. Soesanti, “Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in yogyakarta, indonesia,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 472–490, nov 2021.
- [26] M. Younas, R. Kamal, M. S. Khalid, and A. Qamar, “Economic planning

- for remote community microgrid containing solar PV, biomass gasifier and microhydro,” in *2018 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*. IEEE, sep 2018.
- [27] J. Li, P. Liu, and Z. Li, “Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid renewable energy system for off-grid power supply and hydrogen production: A case study of west china,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 177, pp. 604–614, jan 2022.
- [28] D. Tiomo and R. Wamkeue, “Dynamic modeling and analysis of a micro-hydro power plant for microgrid applications,” in *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE, may 2019.
- [29] I. Sami, N. Ullah, S. M. Muyeen, K. Techato, M. S. Chowdhury, and J.-S. Ro, “Control methods for standalone and grid connected micro-hydro power plants with synthetic inertia frequency support: A comprehensive review,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176 313–176 329, 2020.
- [30] D. Atkar, P. S. Udakhe, S. Chiriki, and V. B. Borghate, “Control of seven level cascaded h-bridge inverter by hybrid SPWM technique,” in *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. IEEE, dec 2016.