



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en
Electrónica y Automatización mención Redes Industriales

**“Diseño e implementación vía simulación de estrategias de control
secundario para plantas fotovoltaicas en micro-redes aisladas”.**

AUTORA: ING. CAJAS BUENAÑO, MILDRED LISSETH

DIRECTOR: ING. ORTIZ VILLALBA, DIEGO EDMUNDO PhD.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

- El acceso a la energía es esencial para reducir la pobreza. La energía posibilita las inversiones, la innovación y las nuevas industrias que son motores de la creación de empleo, el crecimiento inclusivo y la prosperidad compartida para economías enteras.

Fuente: bancomundial.org

- El acceso universal a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, resulta esencial para lograr otros ODS, y constituye el eje de los esfuerzos para hacer frente al cambio climático.

Fuente: Objetivos de Desarrollo Sostenible- Naciones Unidas



ACCESO A LA ELECTRICIDAD A NIVEL MUNDIAL



La tasa de electrificación mundial alcanzó el 87%; el número de personas sin acceso a la electricidad se redujo a unos 840 millones, frente a 1.000 millones en 2016 y 1.200 millones en 2010.

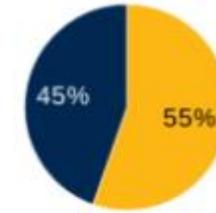


Con las políticas actuales, se estima que el 8% de la población mundial no tendrá acceso a la electricidad en 2030, el 90% de ellos en el África.

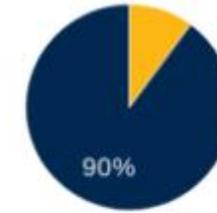


Un mayor compromiso político, una planificación energética a largo plazo, un aumento de la financiación privada y unos incentivos políticos y fiscales adecuados serán cruciales para lograr el acceso universal.

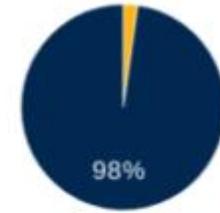
 Sin acceso a la electricidad
 Acceso a la electricidad



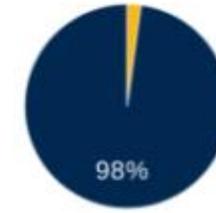
África al sur del Sahara



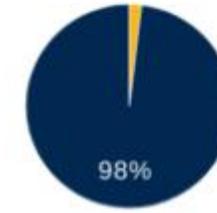
Asia meridional



Oriente Medio y Norte de África



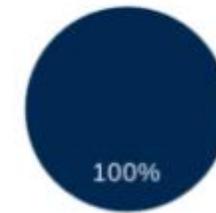
Asia oriental y el Pacífico



América Latina y el Caribe



Europa y Asia Central



América del Norte

Fuente: Fuente: Indicadores del Desarrollo Mundial (EG.ELC.ACCS.ZS) • Embed this chart

DATOS DESTACABLES



El 13% de la población mundial aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad.



3000 millones de personas dependen de la madera, el carbón, el carbón vegetal o los desechos de origen animal para cocinar y calentar la comida.



La energía es el factor que contribuye principalmente al cambio climático y representa alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

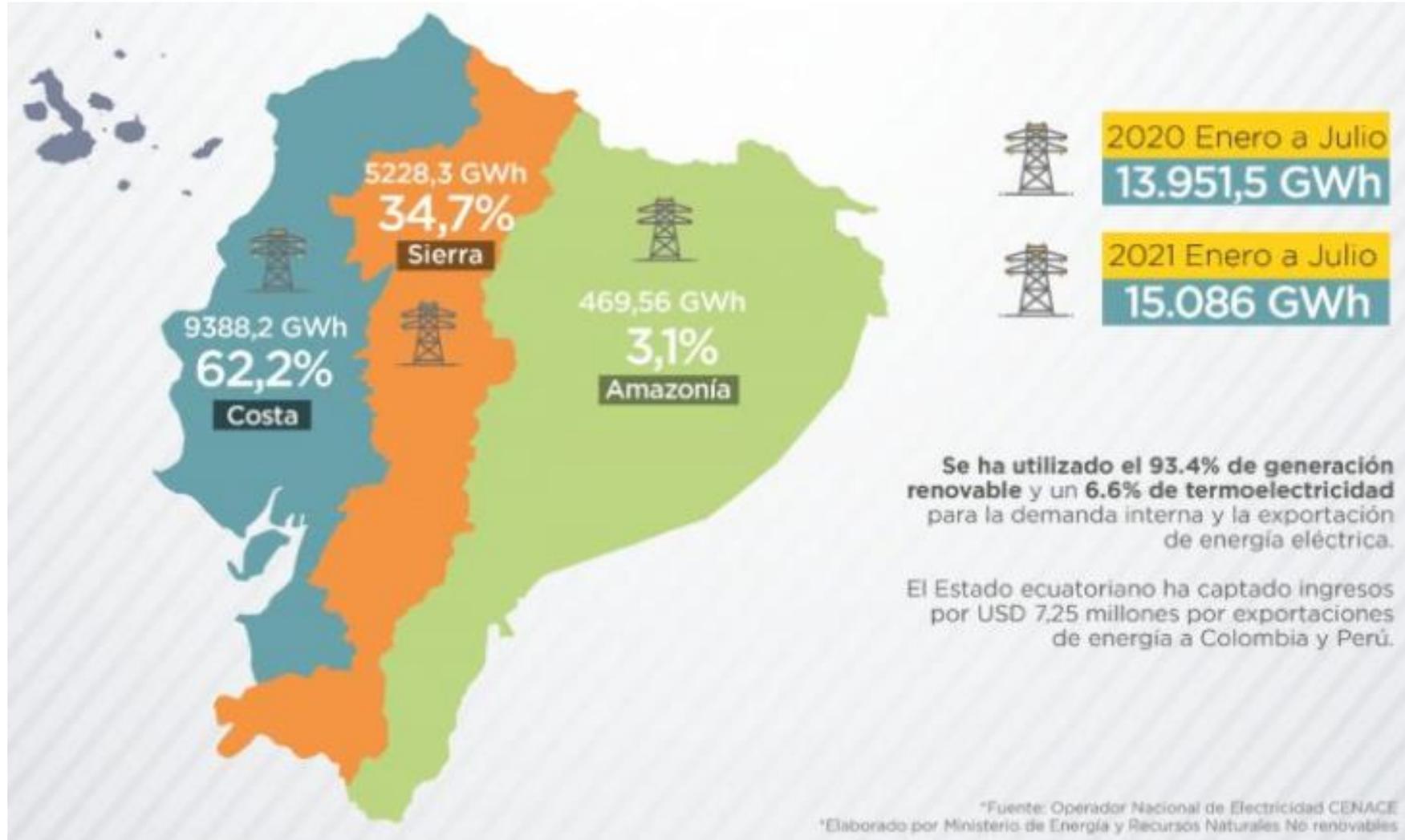


La contaminación del aire en locales cerrados debido al uso de combustibles para la energía doméstica causó 4,3 millones de muertes en 2012, 6 de cada 10 de estas fueron mujeres y niñas.



En 2015, el 17,5% del consumo final de energía fue de energías renovables.

DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA EN ECUADOR 2021



OBJETIVOS

General

Diseñar y simular una estrategia de control secundario para plantas de generación fotovoltaica en micro-redes aisladas para la restauración de la frecuencia.

Específicos

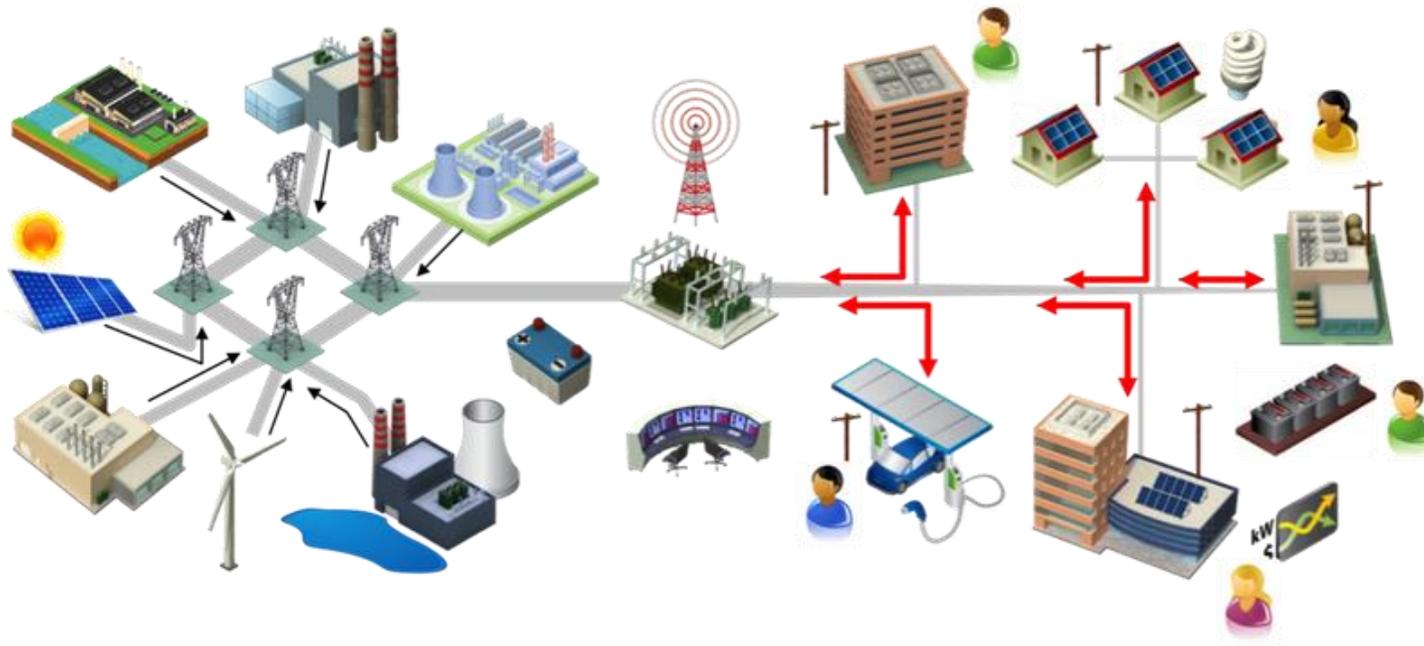
Simular de manera detallada todos los componentes que forman parte de una planta de generación fotovoltaica y verificar su adecuado desempeño bajo diferentes escenarios de operación.

Desarrollar e implementar una estrategia de control secundario vía simulación para restauración de frecuencia.

Implementar un algoritmo de control para restauración de frecuencia en una planta fotovoltaica en el nivel secundario.

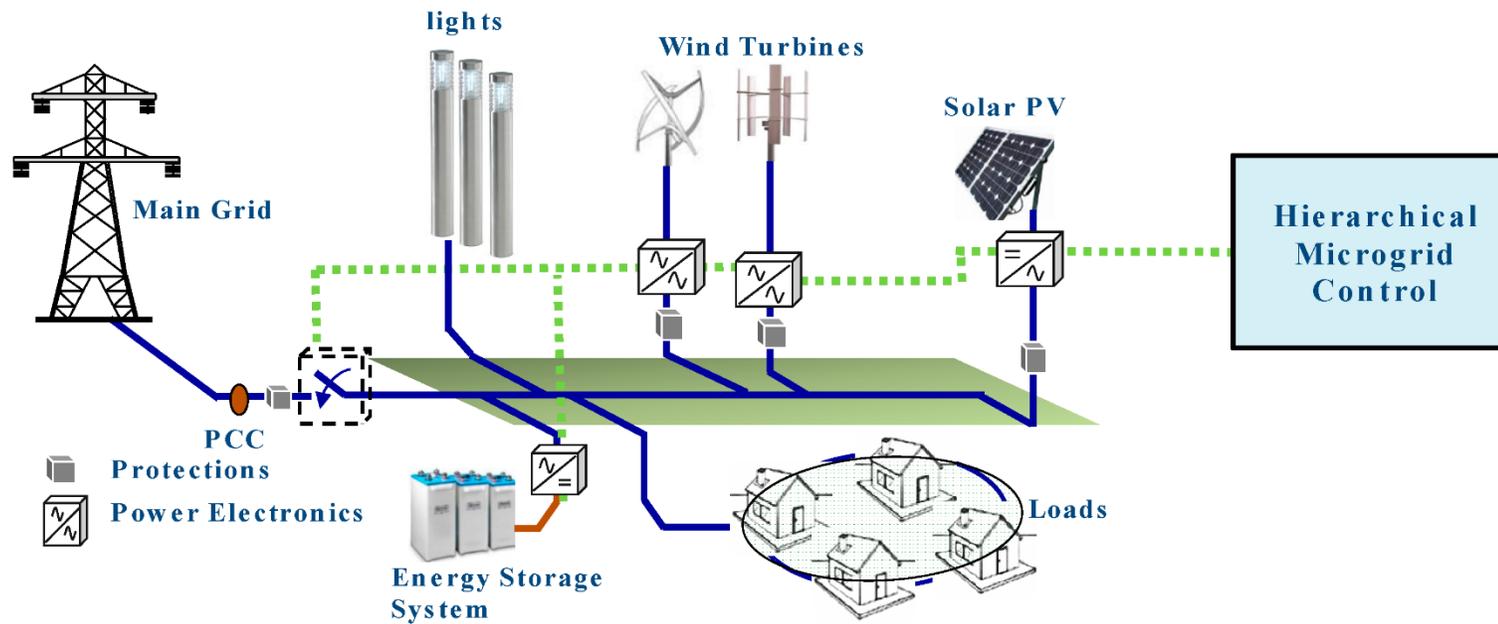
Evaluar y validar el desempeño de la estrategia de control propuesta y realizar un análisis de los resultados alcanzados.

MICROREDES



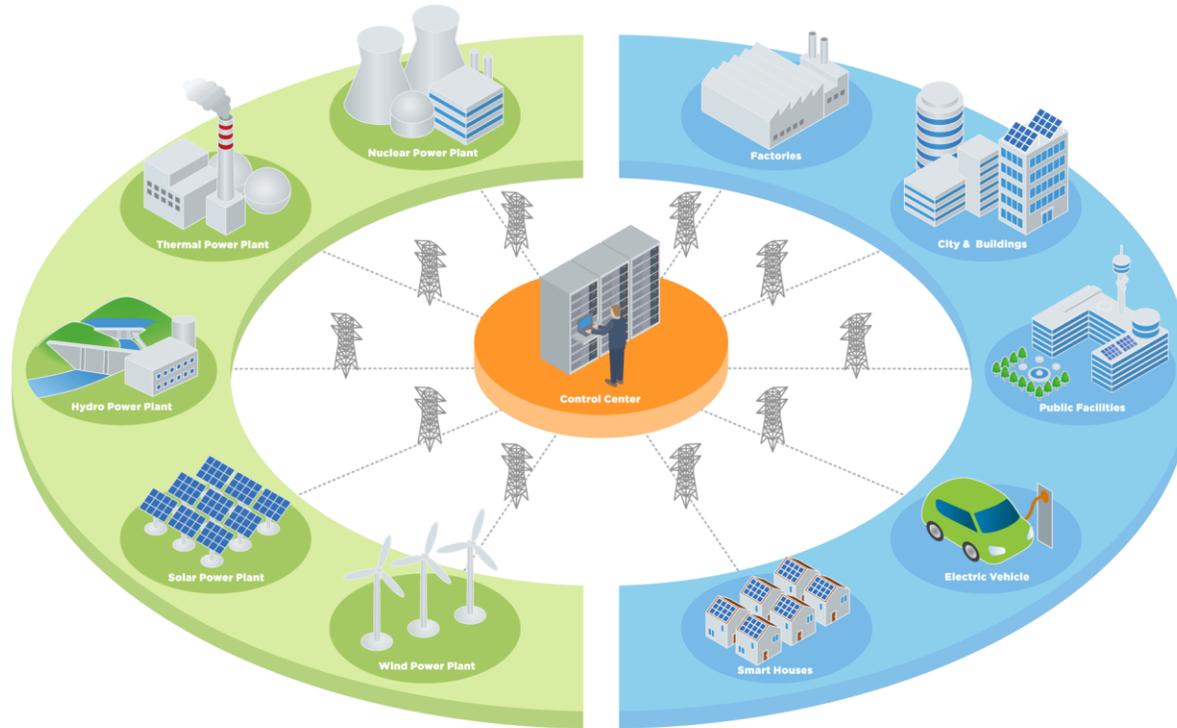
- Sistemas que integran energías renovables para la generación de electricidad y el almacenamiento energético.
- Pueden trabajar conectadas a la red o en modo isla.

MICRORED CONECTADA A LA RED



- Permite mantener el suministro de energía eléctrica cuando hay un corte en la red principal.
- Permiten reducir las emisiones de CO₂.

MICRORED AISLADA DE LA RED



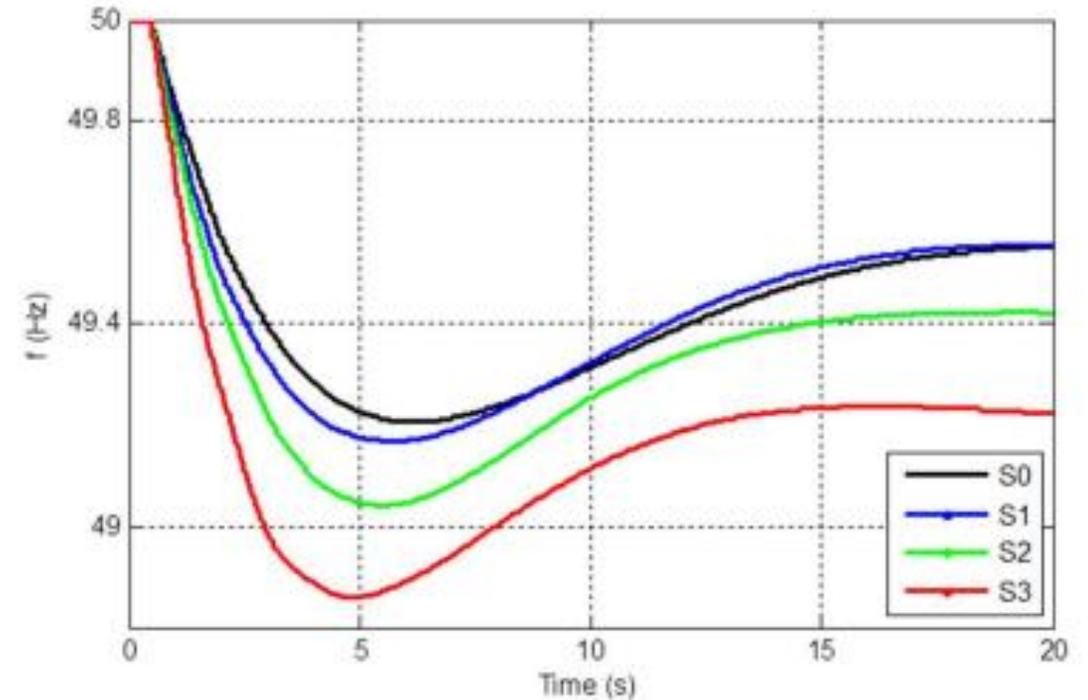
- Permiten abastecer la demanda eléctrica en zonas en donde no se puede acceder al suministro eléctrico.
- Costo de instalación, operación y reposición suelen ser altos.
- Desafíos debido a la incertidumbre de los recursos renovables y a las variaciones en la demanda.

DESAFÍO

Uno de los desafíos más importantes desde la perspectiva del control de micro-redes, reside en poder operarlas de forma **segura** y **confiable** cuando se encuentran aisladas de una **red externa**. Uno de los motivos de lo anterior es que, en el caso de una **micro-red** operada en **modo aislado**, la regulación de **voltaje/frecuencia** y el balance entre **generación y demanda** ya **no** son apoyados por la **red principal**. Esto provoca que las fuentes de generación que se encuentran al interior de la micro-red no se pueden controlar para que entreguen valores fijos de potencia activa y reactiva (como se hace comúnmente en una micro-red operando en modo conectado), sino que **se deben implementar estrategias de control** que procuren que las fuentes de generación de la micro-red participen en la regulación de tensión y frecuencia de la red

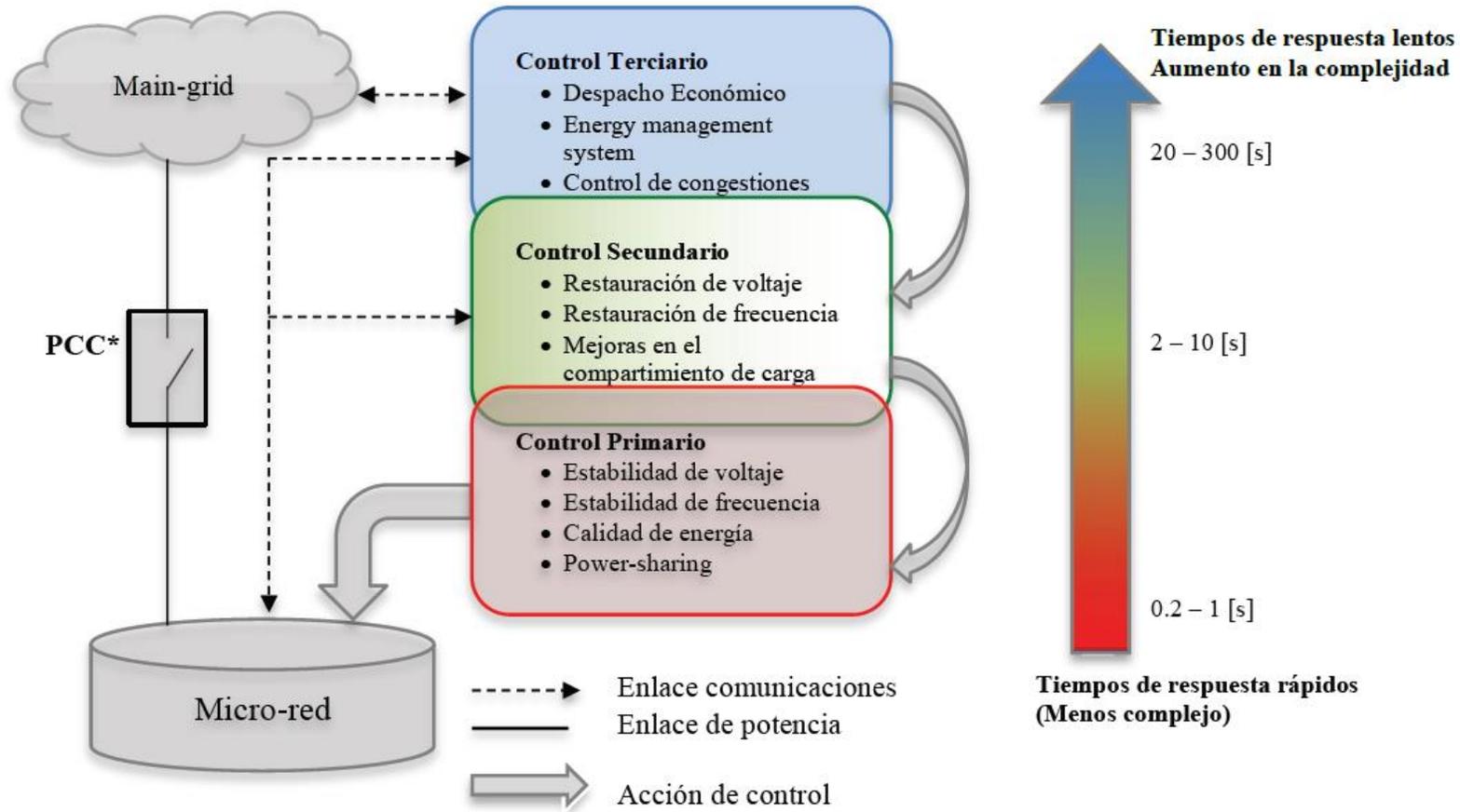
RESPUESTA INERCIAL- MÁQUINAS SÍNCRONAS + ERNC

Escenario	Inyección de Generadores Convencionales	de	Inyección de (PV-PPs)	PV/Demanda	Promedio Constante Inercia
	MW		MW	%	s
S0	2219		0	0	4.50
S1	1811		401	19	3.96
S2	1377		839	39	3.41
S3	1114		1137	53	3.29

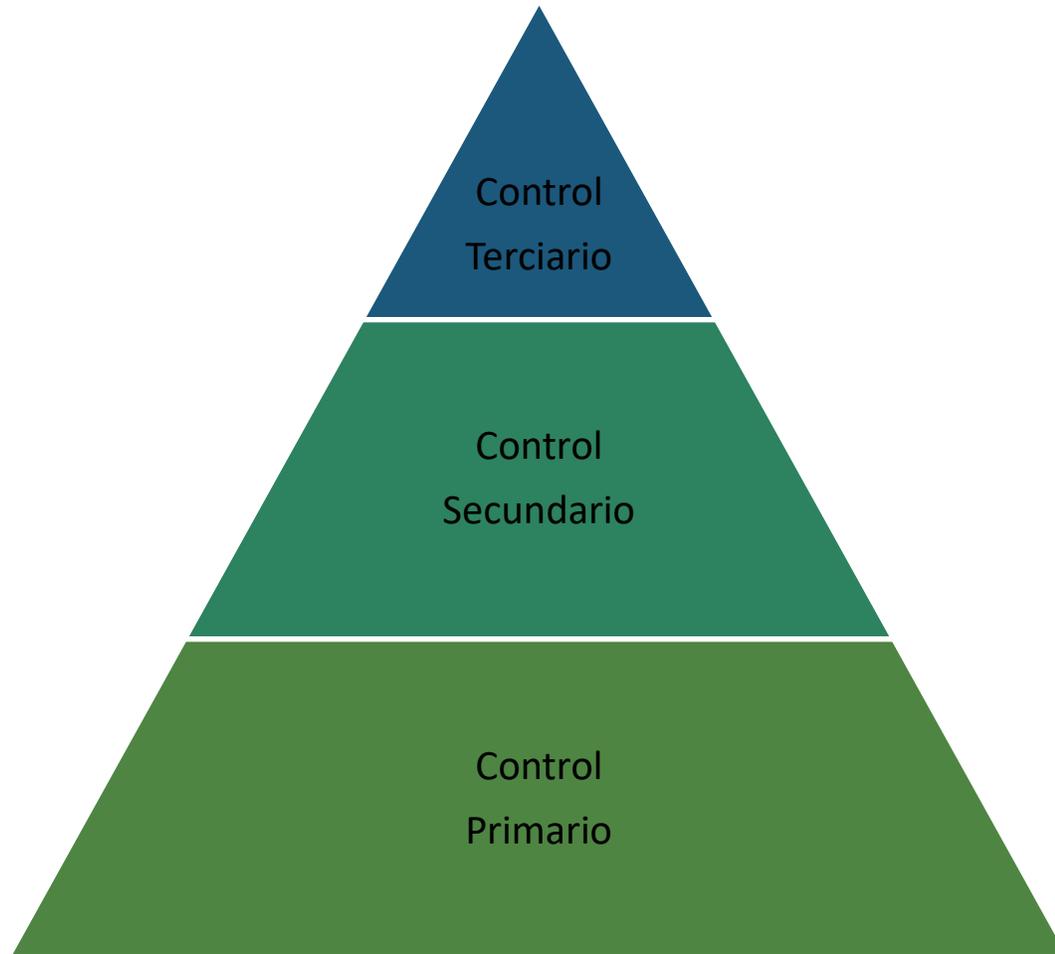


Fuente: Universidad de Chile, Análisis de Respuesta de Frecuencia en Sistemas de Potencia con altos niveles de generación Y variable sin inercia, 2015

ARQUITECTURA DE CONTROL

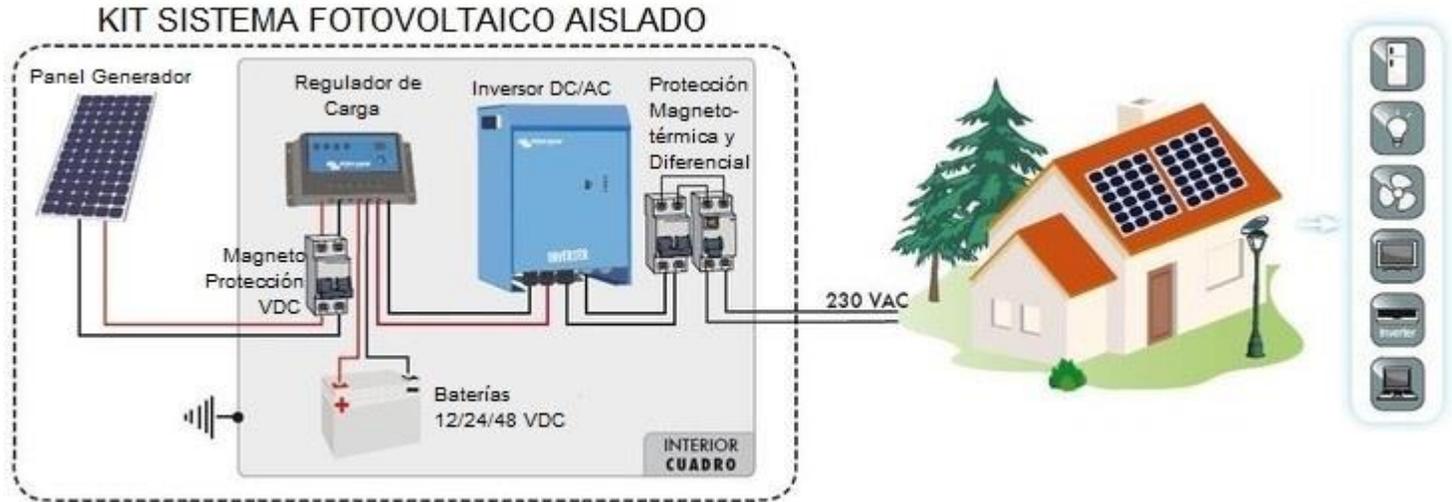
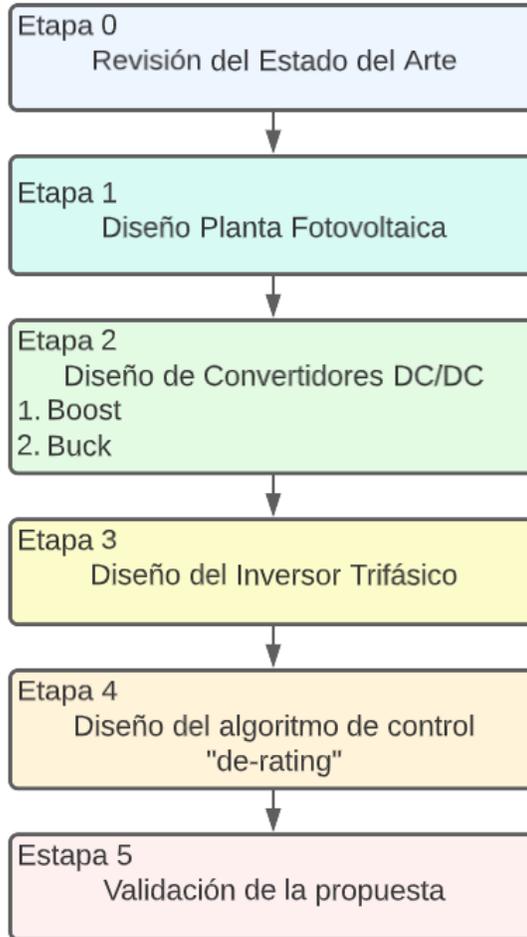


ARQUITECTURA DE CONTROL



- Realiza acciones de control adicionales para **restaurar el voltaje y la frecuencia a sus valores nominales.**

METODOLOGÍA

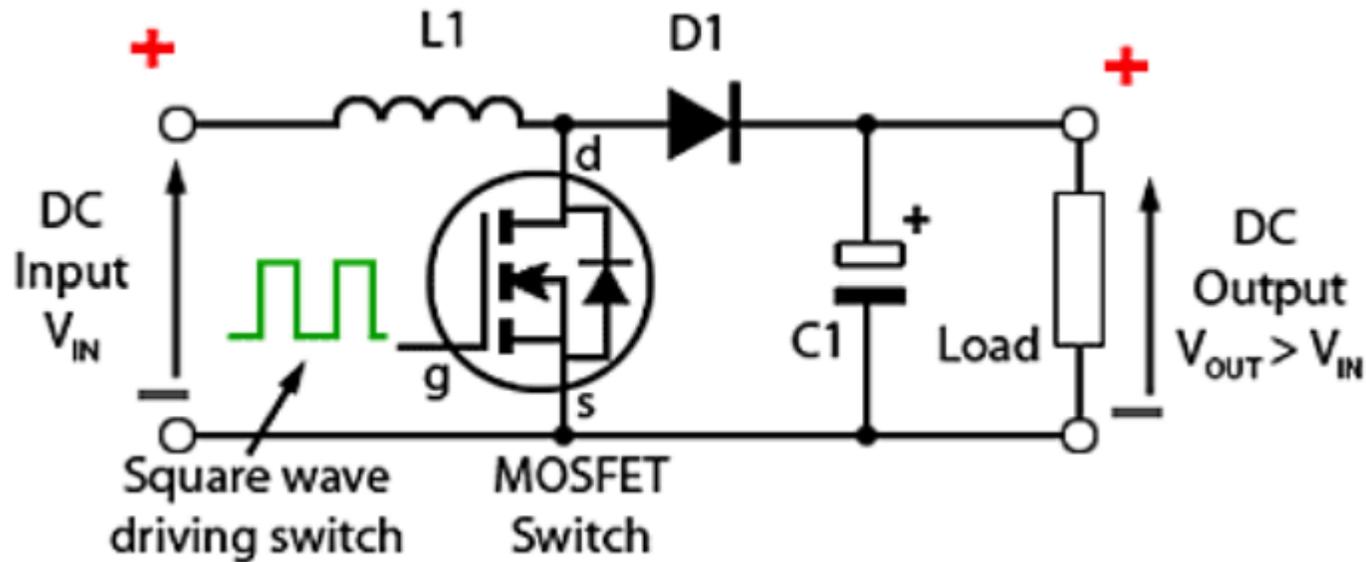


$$P_{pv} = \text{Maximum Power} * (\text{Parallel strings} * \text{Series connected modules per string})$$

$$P_{pv} = (213,15 \cdot 24 \cdot 10)$$

$$P_{pv} \cong 51 \text{ [kW]}$$

ESQUEMA DEL CONVERTIDOR BOOST



$$L_{min} = \frac{D \cdot V_{in}^2}{2f \cdot P_o}$$

$$L_{min} = \frac{0,85 \cdot 363V}{2 \cdot 10KHz \cdot 13,8kW}$$

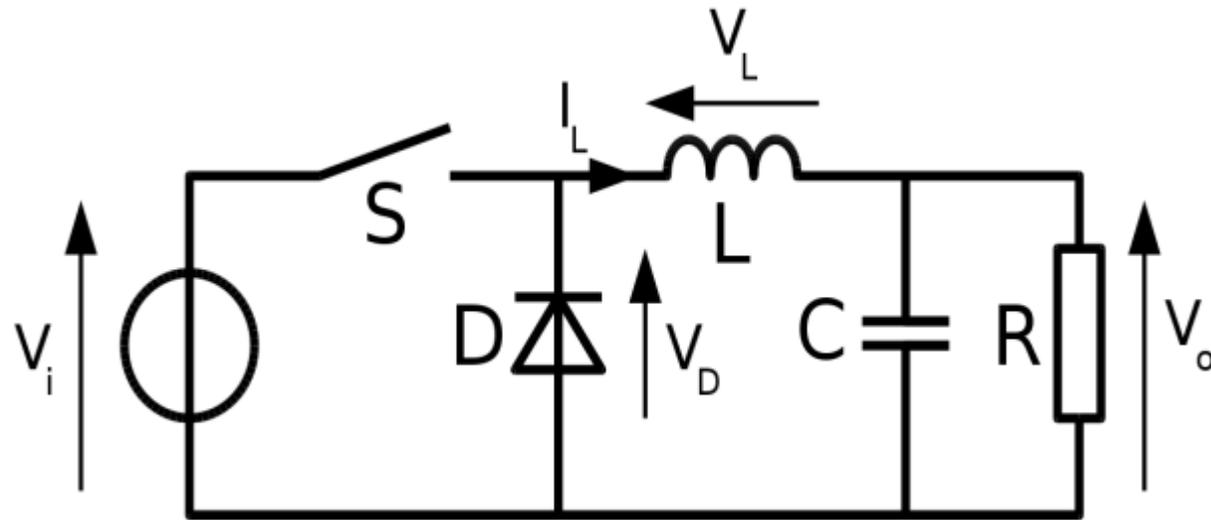
$$L_{min} = 1,12\mu H$$

$$C = \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot P_o}{\frac{\Delta V_o}{V_o} \cdot F \cdot V_{in}^2}$$

$$C = \frac{(0,85 \cdot (1 - 0,85)^2 \cdot 13,8KW)}{0,001 \cdot 10KHz \cdot 363^2}$$

$$C = 220,3\mu F \cong 200 \mu F$$

ESQUEMA DEL CONVERTIDOR BUCK



$$L_{min} = \frac{(1 - D) \cdot R}{2F}$$

$$L_{min} = \frac{(1 - D) \cdot V_o^2}{2F \cdot P_o}$$

Para $D = 0,2$; $V_o = 300V$; $P_o = 50KW$

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,2) \cdot 300V^2}{2 \cdot 25000 \text{ Hz} \cdot 50000W}$$

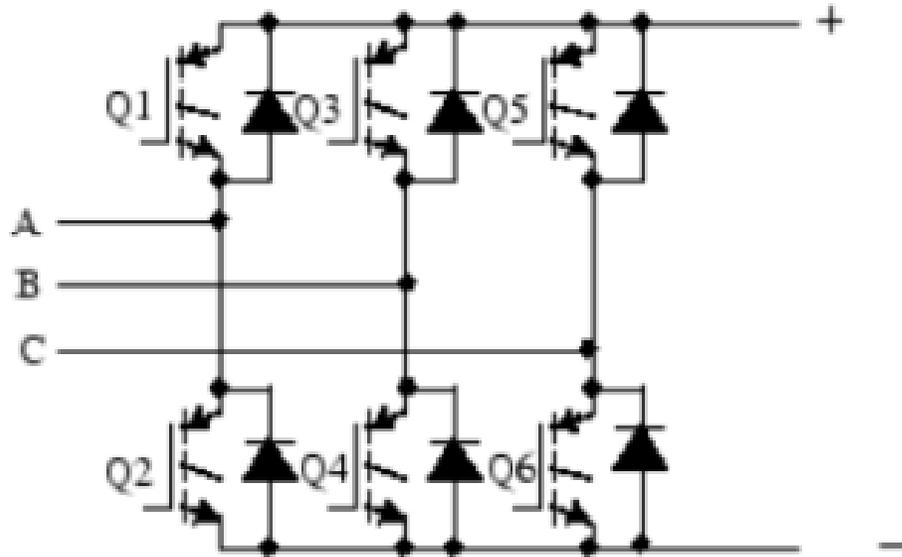
$$L_{min} = 720 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1 - D}{8L \cdot \frac{\Delta V_o}{V_o} \cdot F^2}$$

$$C = \frac{1 - 0,2}{8 \cdot 720mH \cdot 0,01 \cdot 25000Hz}$$

$$C = 560 \mu F$$

DISEÑO DEL INVERSOR TRIFÁSICO



Block Parameters: PWM Generator (2-Level)

PWM Generator (2-Level) (mask) (link)

Generate pulses for PWM-controlled 2-Level converter, using carrier-based two-level PWM method. The block can control switching devices of single-phase half-bridge, single-phase full-bridge (unipolar or bipolar modulation) or three-phase bridge.

When the Synchronized mode of operation is selected, a second input is added to the block, and the internal generation of modulating signal is disabled. Use input 2 (wt) to synchronize the carrier.

Generator type: Three-phase bridge (6 pulses)

Carrier

Mode of operation: Unsynchronized

Frequency (Hz): 83*60 Initial phase (degrees): 90

Minimum and maximum values: [Min Max] [-1 1]

Reference signal

Sampling technique: Natural

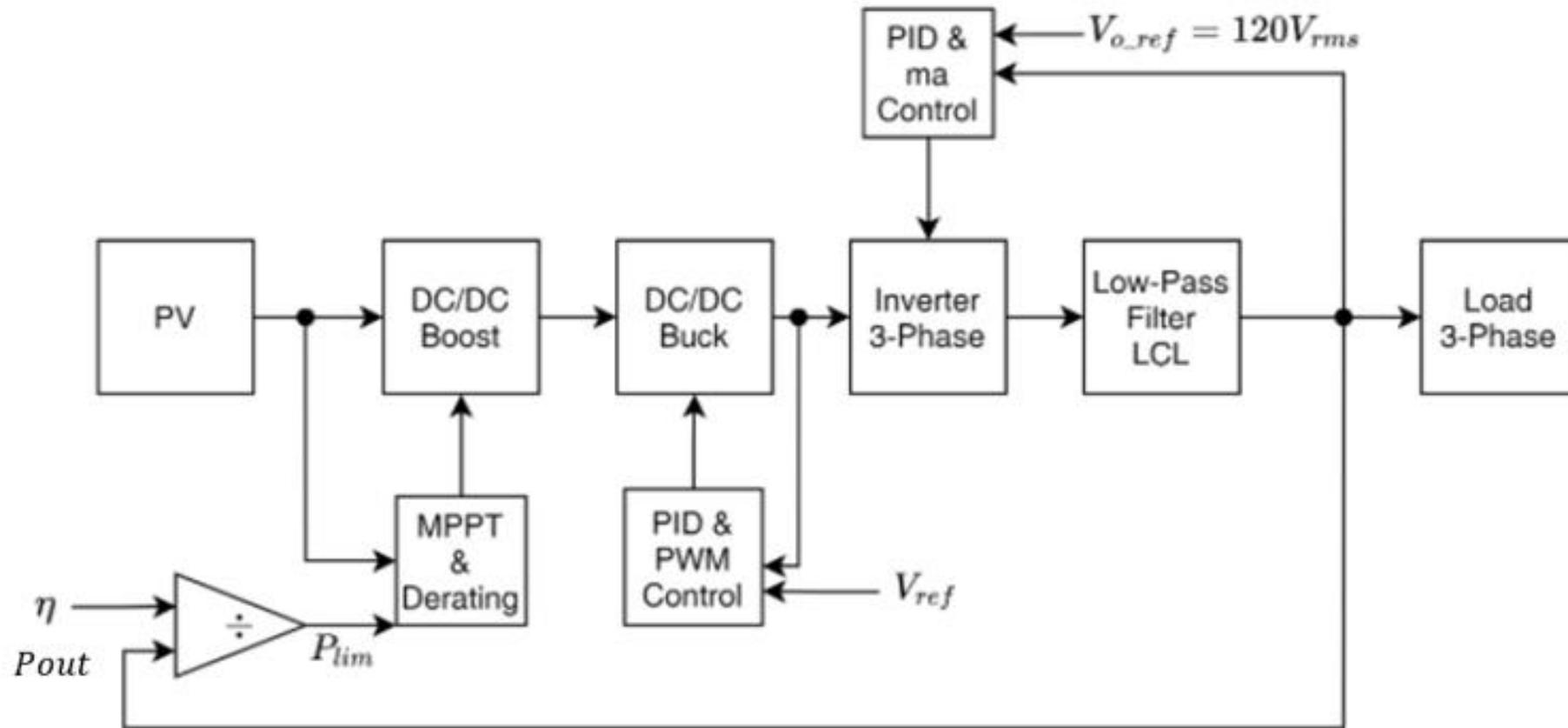
Internal generation of reference signal

Sample time (s): 10e-6

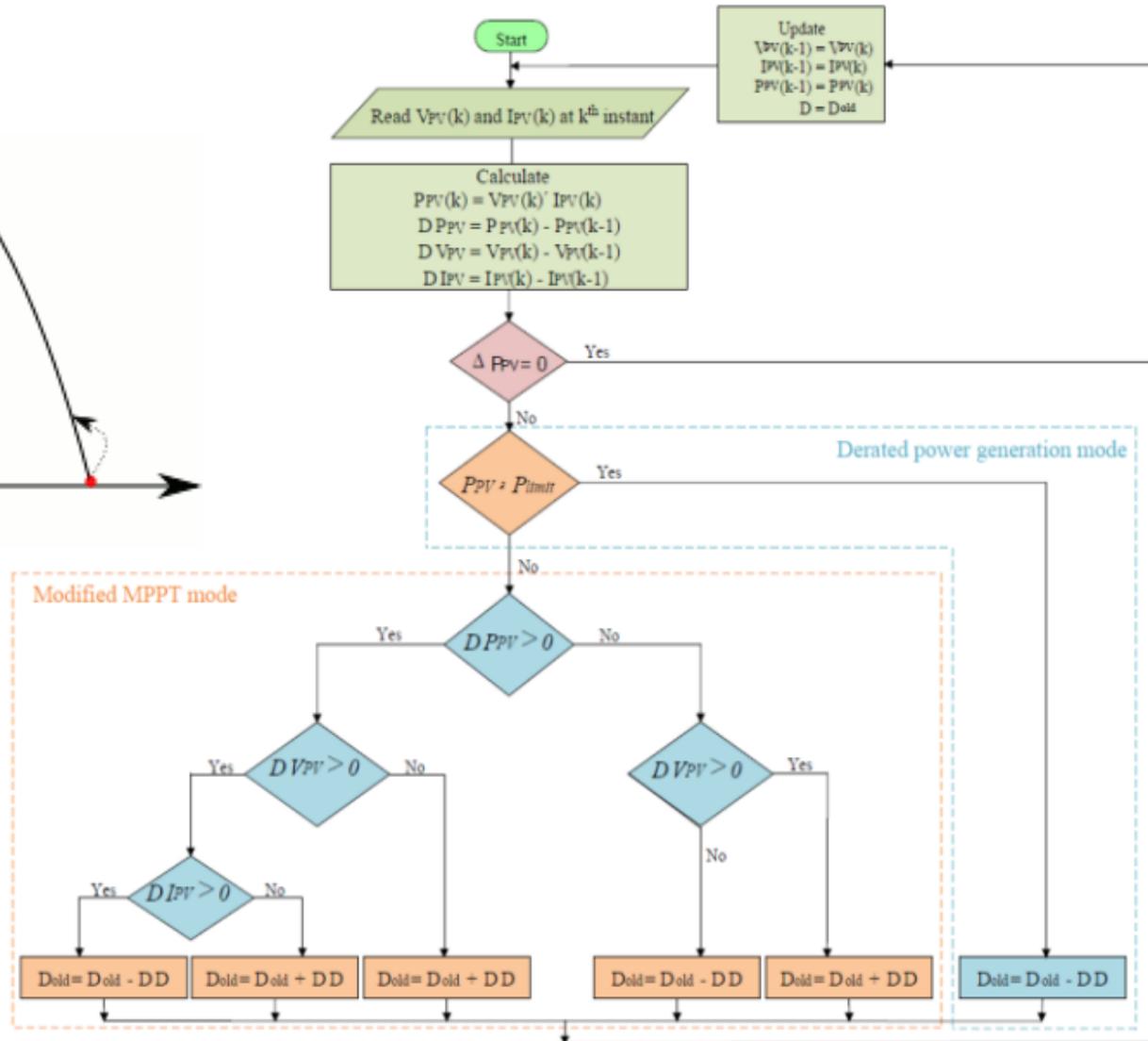
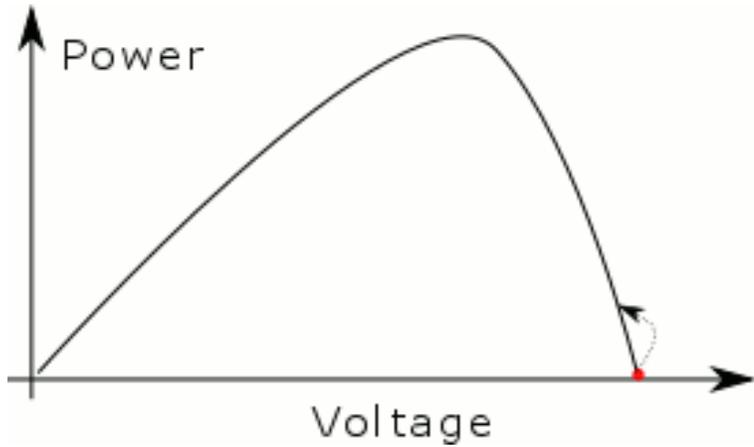
Show measurement port

OK Cancel Help Apply

ALGORITMO DE CONTROL DERATING



ALGORITMO DE CONTROL DERATING



ANÁLISIS DE RESULTADOS

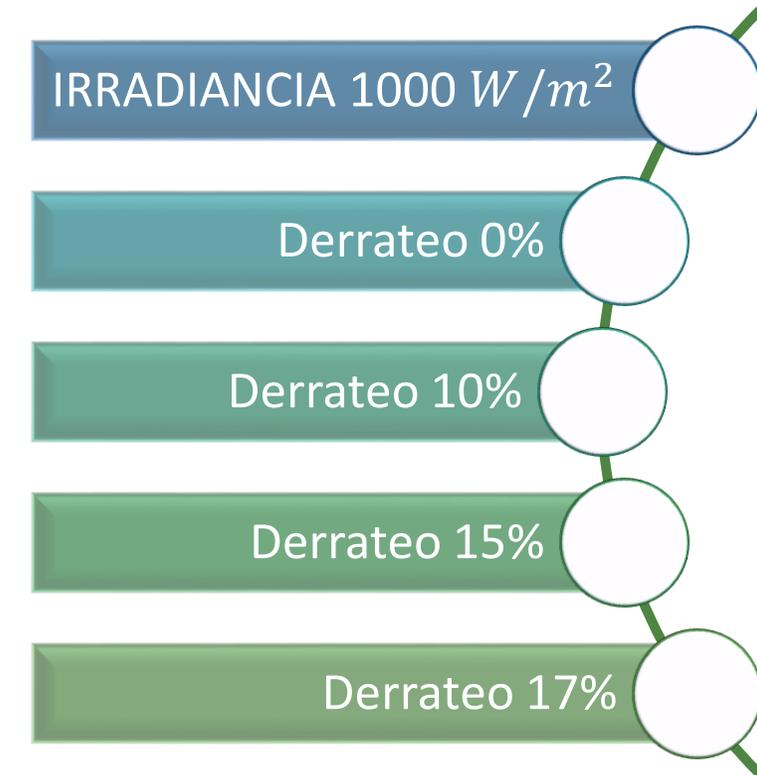
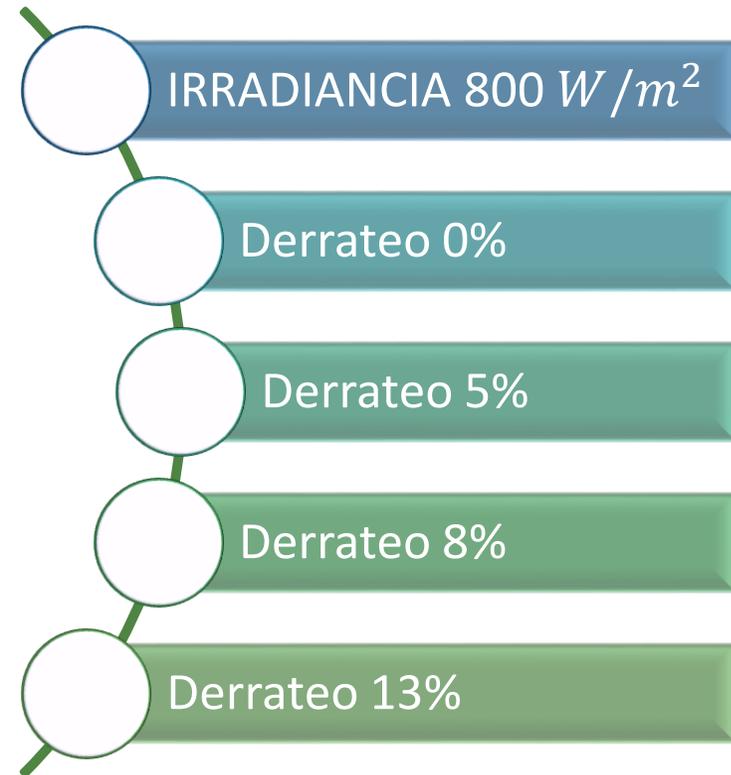
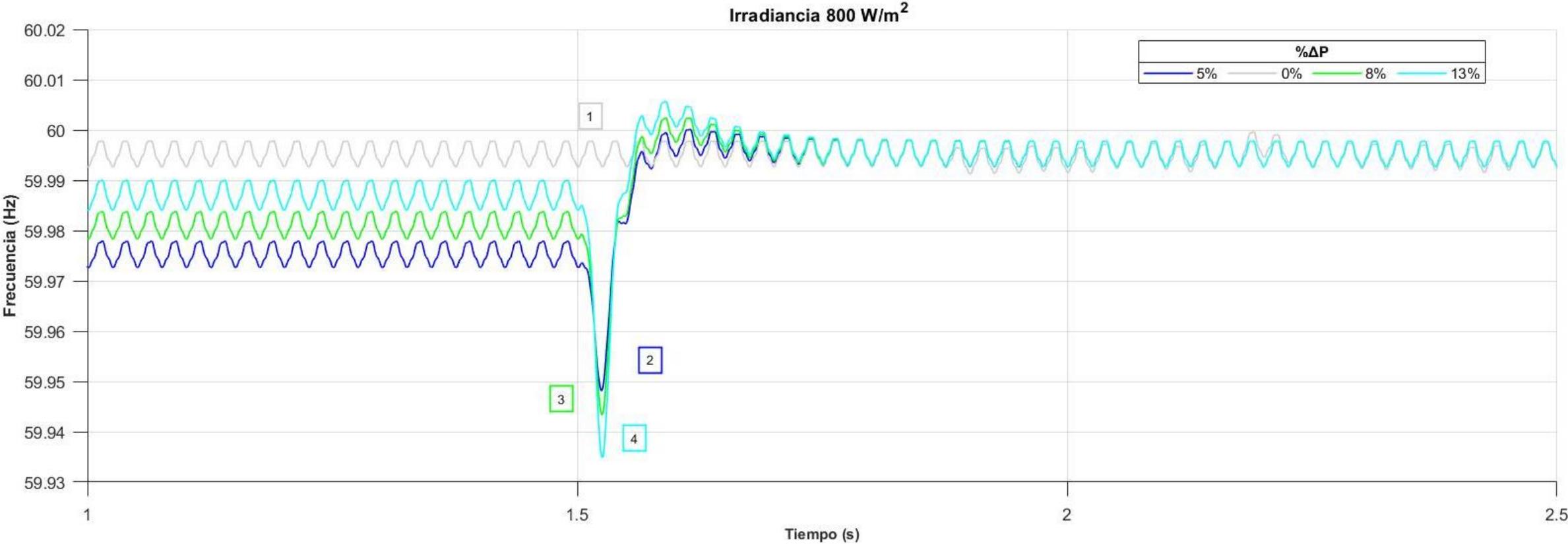


TABLA DE RESULTADOS

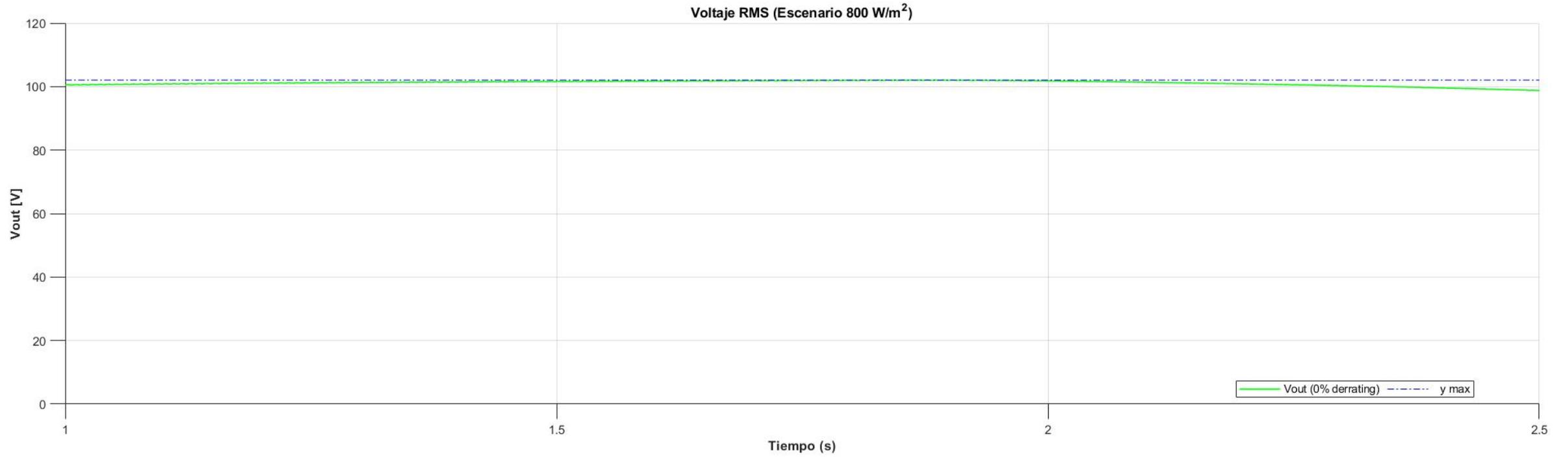
IRRADIANCIA 800 W/m^2

PORCENTAJE DE DERRATEO	Variación de carga ΔP [W]	POTENCIA PANELES FOTOVOLTAICOS [W]	POTENCIA CONVERTIDOR BOOST [W]	POTENCIA CONVERTIDOR BUCK [W]	POTENCIA EN LA CARGA [W]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	FRECUENCIA antes de la perturbación [Hz]	FRECUENCIA A MÍNIMA [Hz]
0%	0,00	40176	39942	39497	38855	101,8	127,2	59,99	59,99
5%	1620	39198	38948	39415	37937	109,2	115,8	59,99	59,95
8%	2845	37782	37538	37008	36719	111,1	110,2	59,99	59,94
13%	442	36345	36107	35578	35514	112,5	105,2	59,99	59,93

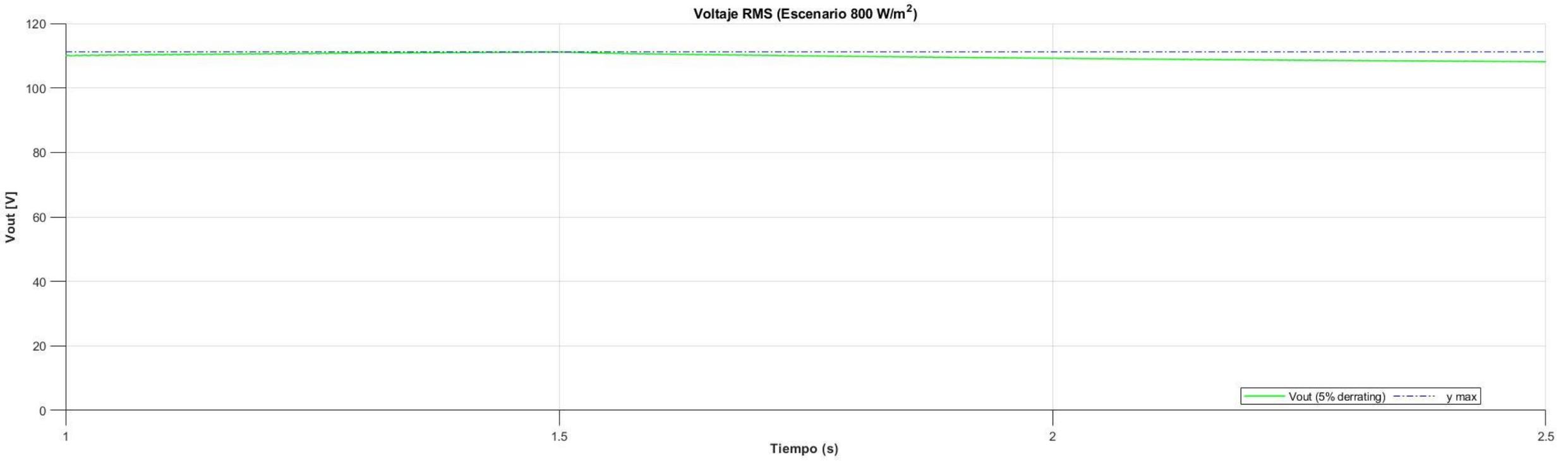
FRECUENCIA



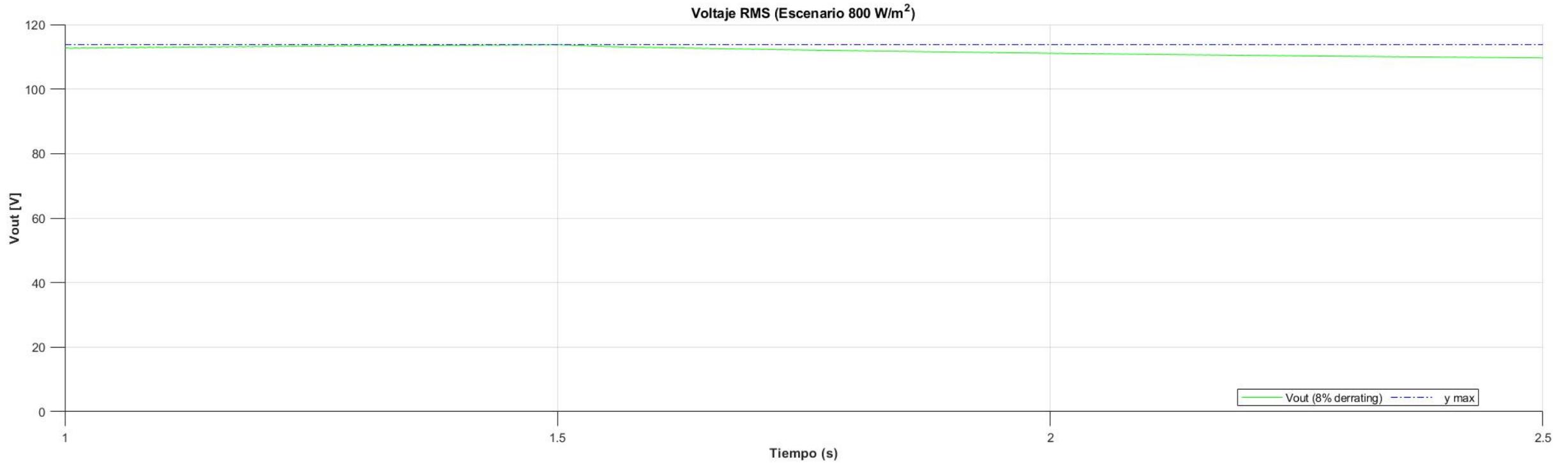
VOLTAJE



VOLTAJE



VOLTAJE



VOLTAJE

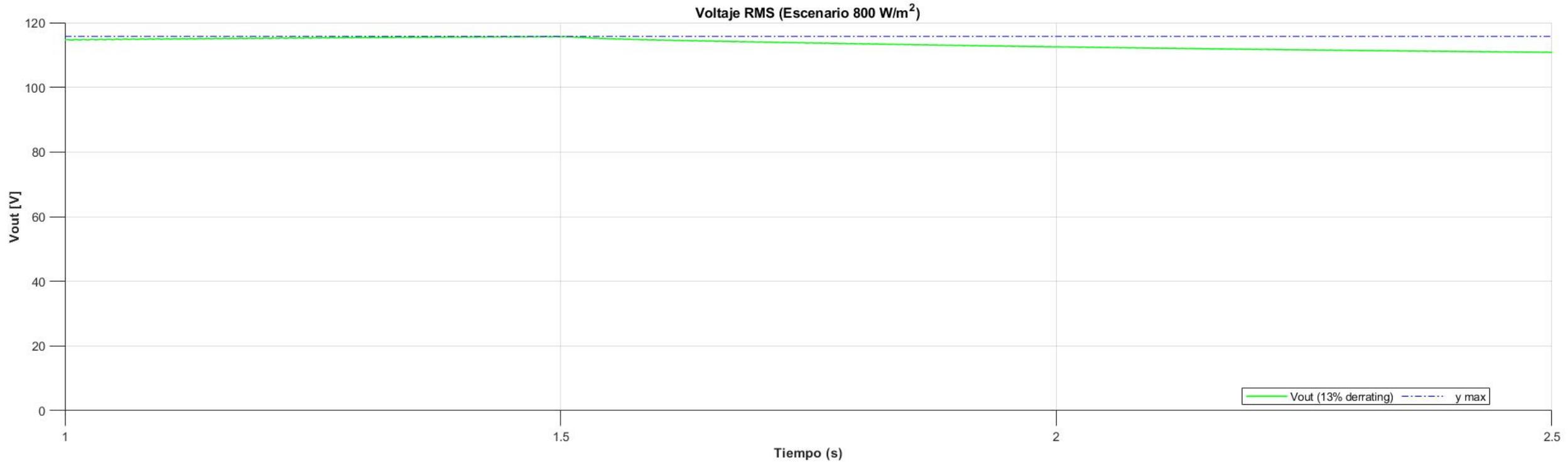
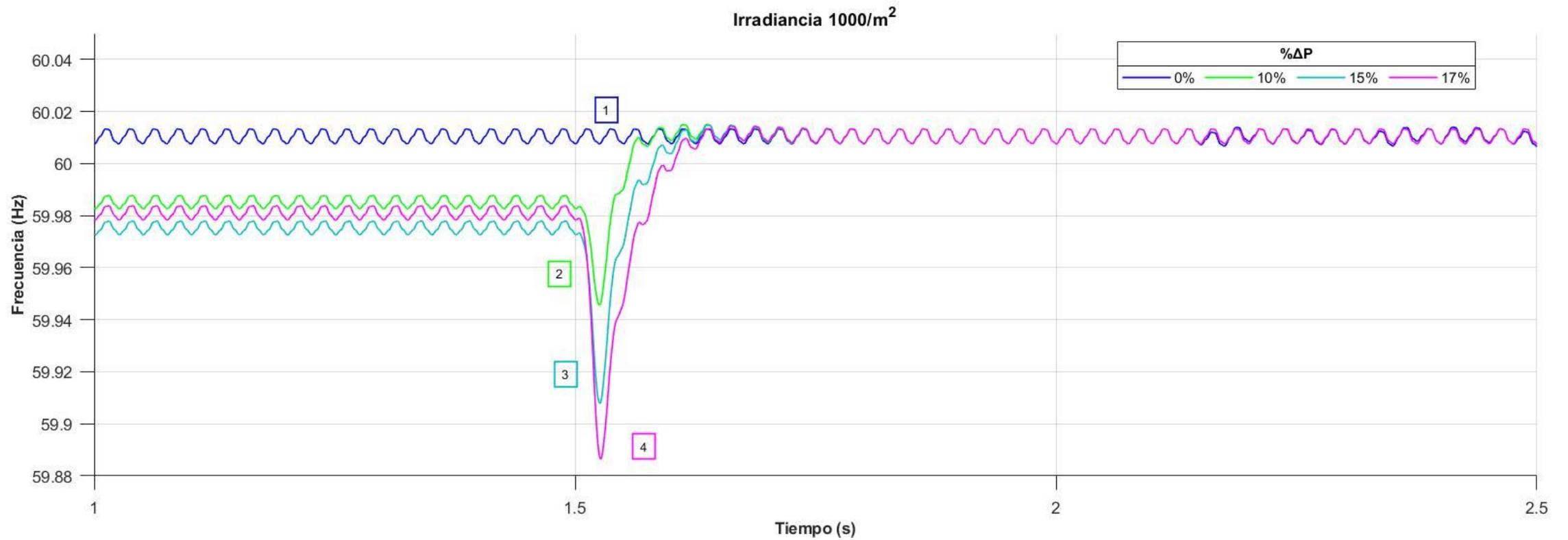


TABLA DE RESULTADOS

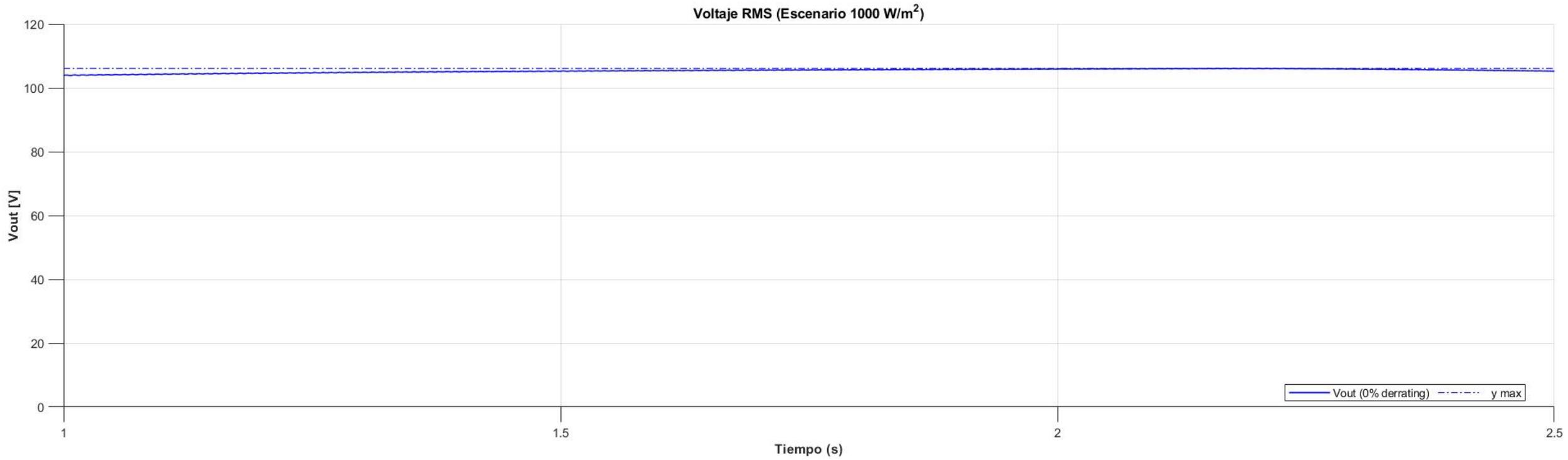
IRRADIANCIA 1000 W/m^2

PORCENTAJE DE DERRATEO	Variación de carga ΔP [W]	POTENCIA PANELES FOTOVOLTAICOS [W]	POTENCIA CONVERTIDOR BOOST [W]	POTENCIA CONVERTIDOR BUCK [W]	POTENCIA EN LA CARGA [W]	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	FRECUENCIA [Hz]	FRECUENCIA A MÍNIMA [Hz]
0%	0,00	4988	49572	48819	48045	105,9	151,2	60,01	60,01
10%	4483	45976	45689	44944	44476	111,6	132,8	60,01	59,95
15%	6993	43842	43564	42821	42639	113,3	125,5	60,01	59,91
17%	8081	41863	41593	40852	40997	114,6	119,3	60,01	59,89

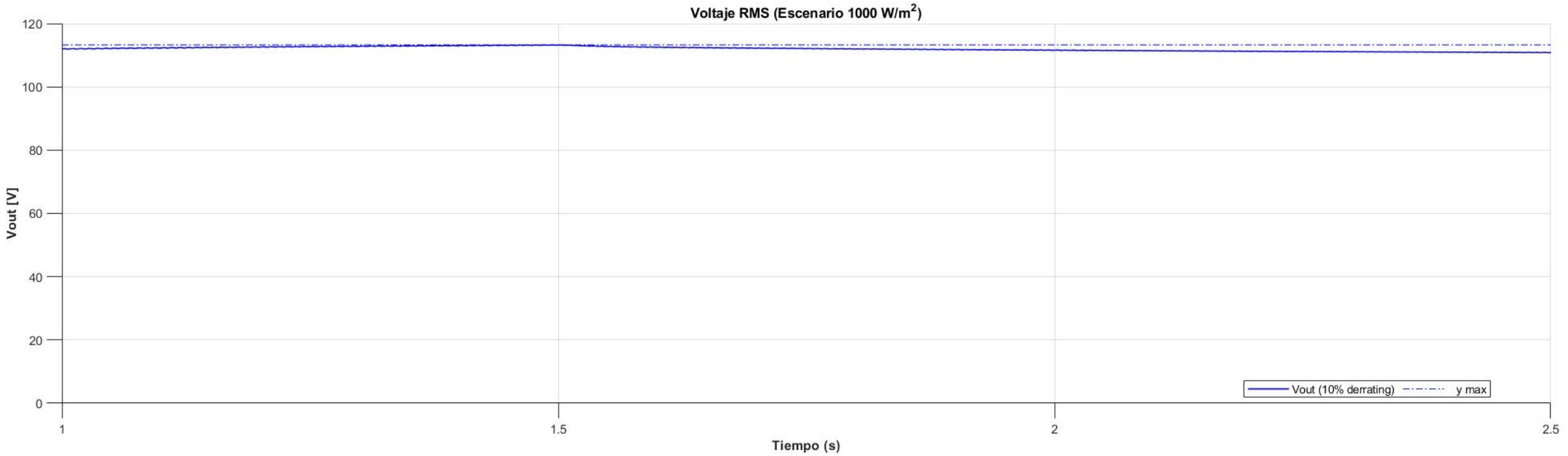
FRECUENCIA



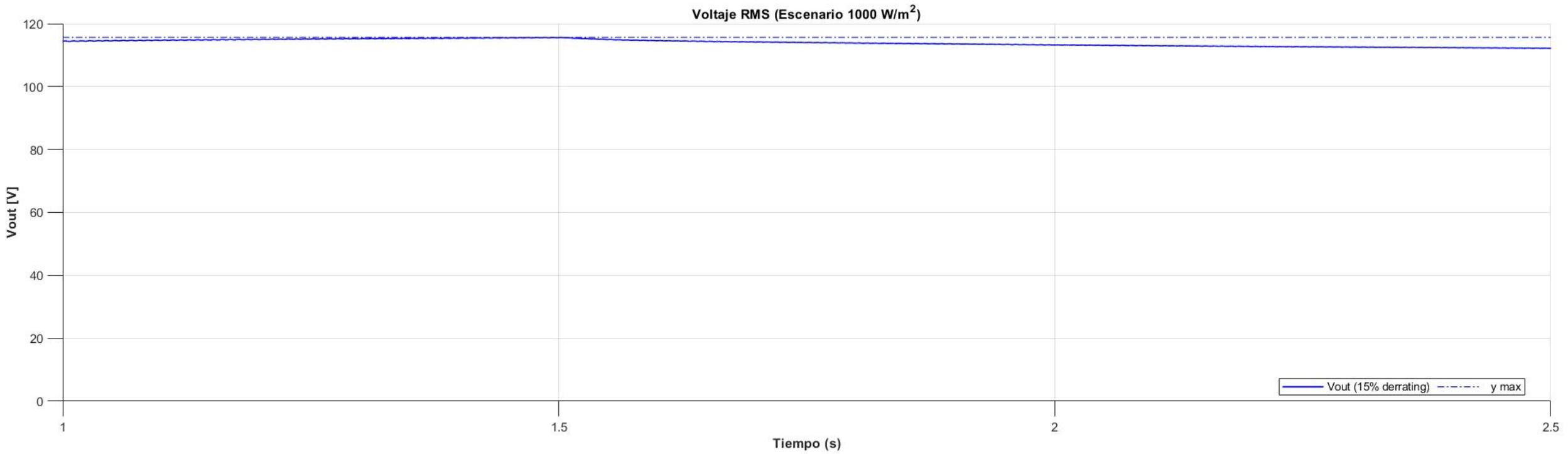
VOLTAJE



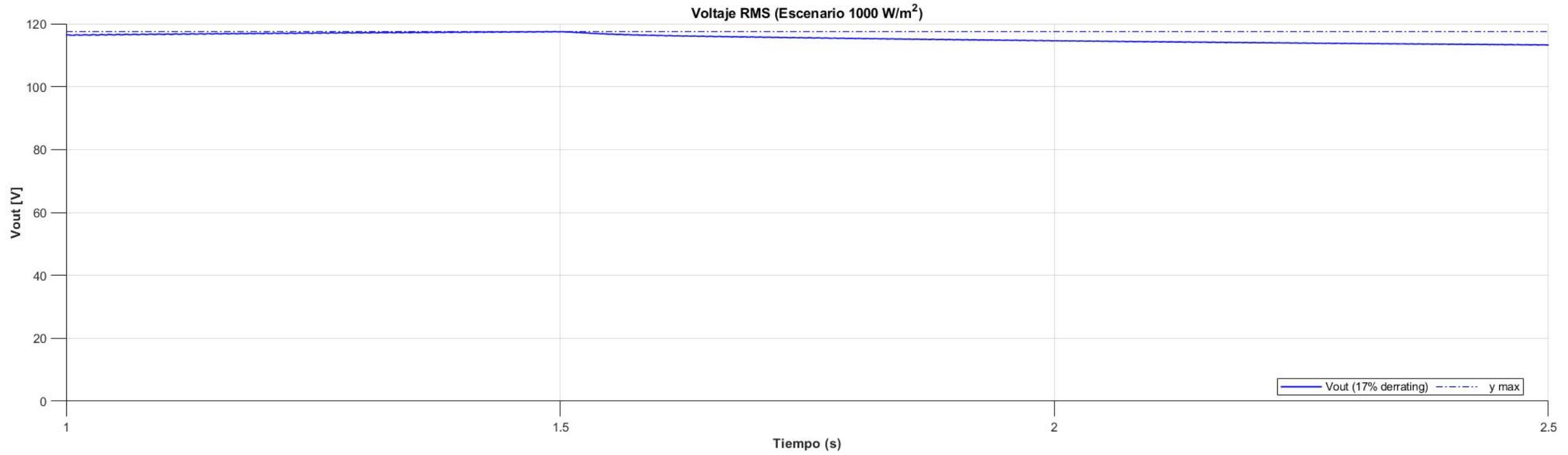
VOLTAJE



VOLTAJE



VOLTAJE



CONCLUSIONES



La modelación e implementación de la planta de generación fotovoltaica para micro redes aislada se logró mediante la unión de un convertidor Boost, Buck, además se implementó un algoritmo de control P&O modificado, es decir se basó en el seguimiento del punto de máxima potencia y el derrateo sobre la señal de potencia con el fin de restaurar la frecuencia del sistema.



Se simularon dos escenarios de operación considerando los niveles de irradiancia de 800 y 1000 W/m², considerando un arreglo de 240 paneles solares que en condiciones ideales de operación inyectan aproximadamente 51 kW. Además, se consideraron tres valores de derrateo para cada caso como se mostró en las tablas 3 y 4, el proceso de derrateo está delimitado en la ventana de tiempo de 0 a 1,5 segundos, con el algoritmo de control implementado se puede restaurar el valor de frecuencia a su valor nominal ante las perturbaciones de carga simuladas, demostrando que los generadores basados en generación renovable pueden contribuir a la regulación de frecuencia.

CONCLUSIONES



Para regular los valores de voltaje se utilizó un convertidor elevador y reductor con el propósito de obtener una señal de salida de voltaje continuo con rizado de $\Delta V_o/V_o=0,001$ y de $\Delta V_o/V_o=0,01$ en el convertidor elevador y reductor respectivamente. El orden de los convertidores permitió que en primera instancia el convertidor Boost busque la máxima potencia del panel en función de la potencia demandada con el algoritmo de control modificado, seguido de un convertidor Buck para mantener una señal de voltaje continuo. En la etapa final, los inversores convierten una señal aproximada de 400 VDC a una señal alterna, para el escenario de 800 W/m² se obtuvieron valores de 106,8 VRMS a 112,5 VRMS y para el escenario de 1000 W/m², se obtuvieron valores de voltaje de 105,9 VRMS a 114,6 VRMS, se verifica que los voltajes se encuentran dentro de lo que se estipula en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 3098.

CONCLUSIONES



Mediante el algoritmo de control modificado se ha logrado restaurar la señal de frecuencia en un rango de $\pm 0,05\%$ considerando la frecuencia nominal de 60Hz. La frecuencia NADIR es de 59,93 Hz para la irradiancia de 800 W/m² y de frecuencia NADIR de 59,89 Hz para la irradiancia de 1000 W/m², el tiempo de recuperación de la frecuencia es de aproximadamente 75 mseg para los dos casos bajo estudio.



El sistema fotovoltaico trifásico aislado permite generar energía eléctrica en función de la demanda aplicando una estrategia de control denominado “Derrateo”, esta estrategia de control permitirá extender la vida útil de los bancos de baterías en los sistemas híbridos de generación, lo que permite extender el desembolso de fondos atribuidos a los costos de reposición de los bancos de baterías.

RECOMENDACIONES



Analizar los parámetros y variables que intervienen en la estrategia de control, para implementar un diseño factible y de bajo tiempo de respuesta para recuperar la señal de frecuencia y abastecer la demanda, en base a los modelos matemáticos del sistema de generación fotovoltaica, tipos de convertidores y los porcentajes de derrateo.



Implementar este sistema de generación de energía eléctrica a partir de la energía solar y verificar el funcionamiento del controlador con diferentes escenarios de irradiancia y conexión-desconexión de carga.

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, S. M., Jawad, M., Khan, B., Mehmood, C. A., Zeb, N., Tanoli, A., Farid, U., Glower, J., & Khan, S. U. (2016). Wide area smart grid architectural model and control: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 311–328. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.006>
- Barth, C., & Pilawa-Podgurski, R. C. N. (2015). Dithering Digital Ripple Correlation Control for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(8), 4548–4559. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2357796>
- Bordón, C. F., Schenberger, L., Berterame, F., Chezzi, C. M., & Penco, J. J. (2018). Estrategia para la Gestión de una Micro Red. *2018 IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting, EPIM 2018, December*. <https://doi.org/10.1109/EPIM.2018.8756437>
- Colmenar Santos, A., Borge Díez, D., Collado Fernández, E., & Castro Gil, M. A. (2015). *Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes*.
- CONELEC. (n.d.). *Demanda eléctrica*. <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/10/PME0920CAP5.pdf>
- Dawei, Z., Minhui, Q., Ma, J., Dajun, J., Maosheng, D., & Xiang, L. (2018). A Decentralized frequency regulation strategy of PV Power Plant based on droop control. *China International Conference on Electricity Distribution, CICED, 201805280000301*, 1824–1828. <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592133>
- Diario El País. (2018). *El 13% de la población mundial aún no tiene acceso a la electricidad*. https://elpais.com/economia/2018/05/02/actualidad/1525257286_099135.html
- Djalab, A., Rezaoui, M. M., Teta, A., & Boudiaf, M. (2018). Analysis of MPPT methods: P O, INC and Fuzzy Logic (CLF) for a PV system. *2018 6th International Conference on Control Engineering and Information Technology, CEIT 2018, October*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2018.8751820>

GRACIAS

