

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Evaluación e Integración de una red híbrida en Optimal Power Flow

Autora: María del Valle Carmona Marín

Tutores: Manuel Barragán Villarejo

Alejandro Marano Marcolini

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería en Tecnologías Industriales

Evaluación e Integración de una red híbrida en Optimal Power Flow

Autora:

María del Valle Carmona Marín

Tutores:

Manuel Barragán Villarejo

Alejandro Marano Marcolini

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Grado: Evaluación e Integración de una red híbrida en Optimal Power Flow

Autora: María del Valle Carmona Marín

Tutores: Manuel Barragán Villarejo
Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mis padres y tías Juana e Isabel, por confiar en mí más que yo misma.

A mi hermano, por ser mi mayor apoyo y mejor consejero, contigo la palabra hermano se queda pequeña.

A mis compañeros y profesores, por haber contribuido a mi evolución tanto personal como profesional durante estos años.

A Ana y María, por superar conmigo todas las piedras del camino y conseguir que al echar la vista atrás recuerde los días malos con una sonrisa.

El siguiente trabajo de fin de grado consiste en el análisis de redes híbridas, entendiéndose como red híbrida a aquella red compuesta por circuitos de alterna y continua interconectados entre sí.

Este análisis pretende poner el foco en la generación distribuida que tanto está apareciendo en los últimos años.

El estudio parte de una red simple de 4 nudos con 4 periodos de tiempo hasta evolucionar a una red de mayor complejidad, red de 12 nudos con un perfil de potencia de 24 horas. Con este último paso, el estudio llega a una situación cercana al comportamiento actual de la sociedad. En ella se aprecian generaciones fotovoltaicas en puntos de consumo y cargas con comportamientos adaptados al tipo de consumo, ya sea hogar o laboral.

Los dos objetivos de interés durante cada estudio es la reducción de pérdidas para conseguir así una red más eficiente.

Durante la búsqueda del objetivo se comparan en todo momento tres situaciones de la red:

1. Situación con de la red sin batería.
2. Situación de la red incluyendo batería.
3. Situación de la red incluyendo batería y conexionado de esta con la red a través de una línea de continua.

De tal manera, se pretende llegar una conclusión obtenidos los resultados de incluir la batería a través de una red de continua.

The following final degree work consists of the analysis of hybrid networks, understanding hybrid network as a network composed of alternating and direct circuits interconnected with each other.

This analysis aims to focus on the distributed generation that has been appearing in recent years.

The study starts with a simple 4-node network with 4 time periods and evolves to a more complex network, a 12-node network with a 24-hour power profile. With this last step, the study arrives at a situation close to the current behavior of society. It shows photovoltaic generations at points of consumption and loads with behaviors adapted to the type of consumption, whether at home or at work.

The two objectives of interest during each study is the reduction of losses in order to achieve a more efficient network.

During the pursuit of the objective, three network situations are compared at all times:

1. Network situation without battery.
2. Grid situation including battery.
3. Grid situation including battery and connection of the battery to the grid via a direct current line.

In this way, it is intended to reach a conclusion obtained from the results of including the battery through a direct current network.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
1 Introducción	1
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivos	3
2 Formulación teórica del Optimal Power Flow	5
2.1 Restricciones de igualdad en el OPF	5
2.1.1 Obtención de datos	6
2.1.2 Construcción de las matrices B y G	7
2.1.3 Elección del nudo Slack	7
2.1.4 Desarrollo del flujo de carga	7
2.2 Restricciones limitantes en el OPF	8
2.3 Función objetivo del OPF	9
3 Validación del modelo	11
3.1 Flujo de carga de la red de 4 nudos	11
3.2 Conexión de una batería en el nudo 3 de la red de 4 nudo directamente	17
3.3 Conexión de una batería en el nudo 3 de la red de 4 nudo a través de una línea de continua	24
4 Resultados en la red a escala de baja tensión de los laboratorios del departamento de Ingeniería Eléctrica	33
4.1 Resultados del flujo de carga de la red a escala de baja tensión	33
4.2 Resultados del conexionado de una batería en el nudo 10 de la red a escala de baja tensión directamente	46
4.3 Resultados del conexionado de una batería en el nudo 10 de la red a escala de baja tensión a través de una línea de continua	61
5 Conclusión	81
6 Referencias	83

Índice de Figuras

Figura 1-1 Ilustración de generación distribuida. Fuente: Universidad de León.	1
Figura 1-2 Consumo de energía final por sectores. Unión Europea vs España. Fuente: AleaSoft Energy Forecasting.	2
Figura 1-3 Consumo de energía final en el sector transporte por combustible. Unión Europea vs España. Fuente: AleaSoft Energy Forecasting.	2
Figura 3-1 Red de 4 nudos.	11
Figura 3-2 Red de 4 nudos en por unidad.	11
Figura 3-3 Resultado del sumatorio de pérdidas por ramas en la red de 4 nudos sin batería	12
Figura 3-4 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de 4 nudos sin batería	13
Figura 3-5 Resultado de la intensidad por la línea 1-2 en la red de 4 nudos sin batería	13
Figura 3-6 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de 4 nudos sin batería	14
Figura 3-7 Resultado de la intensidad por la línea 3-4 en la red de 4 nudos sin batería	14
Figura 3-8 Resultado de la tensión en el nudo 1 en la red de 4 nudos sin batería	15
Figura 3-9 Resultado de la tensión en el nudo 2 en la red de 4 nudos sin batería	15
Figura 3-10 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de 4 nudos sin batería	16
Figura 3-11 Resultado de la tensión en el nudo 4 en la red de 4 nudos sin batería	16
Figura 3-13 Red de 4 nudos con batería	17
Figura 3-14 Resultado del sumatorio de pérdidas por ramas en la red de 4 nudos sin batería y con batería	17
Figura 3-15 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de 4 nudos sin batería y con batería	18
Figura 3-16 Resultado de la intensidad por la línea 1-2 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	19
Figura 3-17 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	19
Figura 3-18 Resultado de la intensidad por la línea 3-4 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	20
Figura 3-19 Resultado de la tensión en el nudo 1 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	20
Figura 3-20 Resultado de la tensión en el nudo 2 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	21
Figura 3-21 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	21
Figura 3-22 Resultado de la tensión en el nudo 4 en la red de 4 nudos sin batería y con batería	22
Figura 3-23 Resultado de la potencia de carga de la batería en la red de 4 nudos con batería	22
Figura 3-24 Resultado de la potencia de descarga de la batería en la red de 4 nudos con batería	23
Figura 3-25 Resultado del estado de la batería en la red de 4 nudos con batería	23
Figura 3-27 Red de 4 nudos con línea de continua y batería	24
Figura 3-28 Resultado del sumatorio de pérdidas por ramas en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	25

Figura 3-29 Resultado la potencia del nudo Slack en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	25
Figura 3-30 Resultado la intensidad por la línea 1-2 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	26
Figura 3-31 Resultado la intensidad por la línea 2-3 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	27
Figura 3-32 Resultado la intensidad por la línea 3-4 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	27
Figura 3-33 Resultado la tensión en el nudo 1 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	28
Figura 3-34 Resultado la tensión en el nudo 2 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	28
Figura 3-35 Resultado la tensión en el nudo 3 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	29
Figura 3-36 Resultado la tensión en el nudo 4 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	30
Figura 3-37 Resultado la potencia de carga de la batería en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	30
Figura 3-38 Resultado la potencia de descarga de la batería en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	31
Figura 3-39 Resultado del estado de la batería en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua	32
Figura 4-1 Red a escala de baja tensión de los laboratorios	33
Figura 4-2 Datos de potencia activa generada en la red a escala de baja tensión del laboratorio con perfiles de potencia	35
Figura 4-3 Datos de potencia activa consumida en la red a escala de baja tensión del laboratorio con perfiles de potencia	35
Figura 4-4 Datos de potencia reactiva consumida en la red a escala de baja tensión del laboratorio con perfiles de potencia	36
Figura 4-5 Resultado del sumatorio de pérdidas en la red de escala de baja tensión sin batería	37
Figura 4-6 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de escala de baja tensión sin batería	38
Figura 4-7 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería	40
Figura 4-8 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería	41
Figura 4-9 Resultado de la intensidad por la línea 5-6 en la red de escala de baja tensión sin batería	42
Figura 4-10 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de escala de baja tensión sin batería	43
Figura 4-11 Resultado de la tensión en el nudo 10 en la red de escala de baja tensión sin batería	44
Figura 4-12 Resultado de la tensión en el nudo 6 en la red de escala de baja tensión sin batería	45
Figura 4-13 Red a escala de baja tensión de los laboratorios con batería	46
Figura 4-14 Resultado del sumatorio de pérdidas en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	47
Figura 4-15 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	48
Figura 4-16 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	49

Figura 4-17 Resultado de la intensidad por la línea 5-10 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	50
Figura 4-18 Resultado de la intensidad por la línea 5-6 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	52
Figura 4-19 Resultado de la tensión del nudo 3 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	53
Figura 4-20 Resultado de la tensión del nudo 10 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	55
Figura 4-21 Resultado de la tensión del nudo 6 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	56
Figura 4-22 Resultado de la potencia de carga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	57
Figura 4-23 Resultado de la potencia de descarga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	58
Figura 4-24 Resultado del estado de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería	59
Figura 4-25 Red a escala de baja tensión de los laboratorios con batería y línea de continua	61
Figura 4-26 Resultado del sumatorio de pérdidas en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	62
Figura 4-27 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	64
Figura 4-28 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	66
Figura 4-29 Resultado de la intensidad por la línea 5-10 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	68
Figura 4-30 Resultado de la intensidad por la línea 5-6 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	70
Figura 4-31 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	71
Figura 4-32 Resultado de la tensión en el nudo 10 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	73
Figura 4-33 Resultado de la tensión en el nudo 6 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	74
Figura 4-34 Resultado de la potencia de carga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	76
Figura 4-35 Resultado de la potencia de descarga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	77
Figura 4-36 Resultado del estado de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua	79

1 INTRODUCCIÓN

Debido a la evolución del sistema eléctrico en los últimos años, ha aparecido el concepto de Generación Distribuida (GD). Dicho concepto se refiere a la generación de electricidad cerca del punto de consumo a pequeña escala. Es conveniente no asociar este tipo de generación a la generación limpia, ya que puede o no, proceder de fuentes de energía renovables. [1]

De esta manera, las principales ventajas de la generación distribuida son:

- **Reducción de pérdidas en la red eléctrica:** Al producirse la generación cerca del consumo, la distancia de transporte se reduce notablemente y esto conlleva una gran reducción de pérdidas durante el transporte y la distribución de la energía. Estas pérdidas son considerables.
- **Aportación de mayor flexibilidad a la red:** El hecho de disponer de este tipo de generación permite que las cargas puedan alimentarse tanto de la red como del autoconsumo aportando flexibilidad a la red.

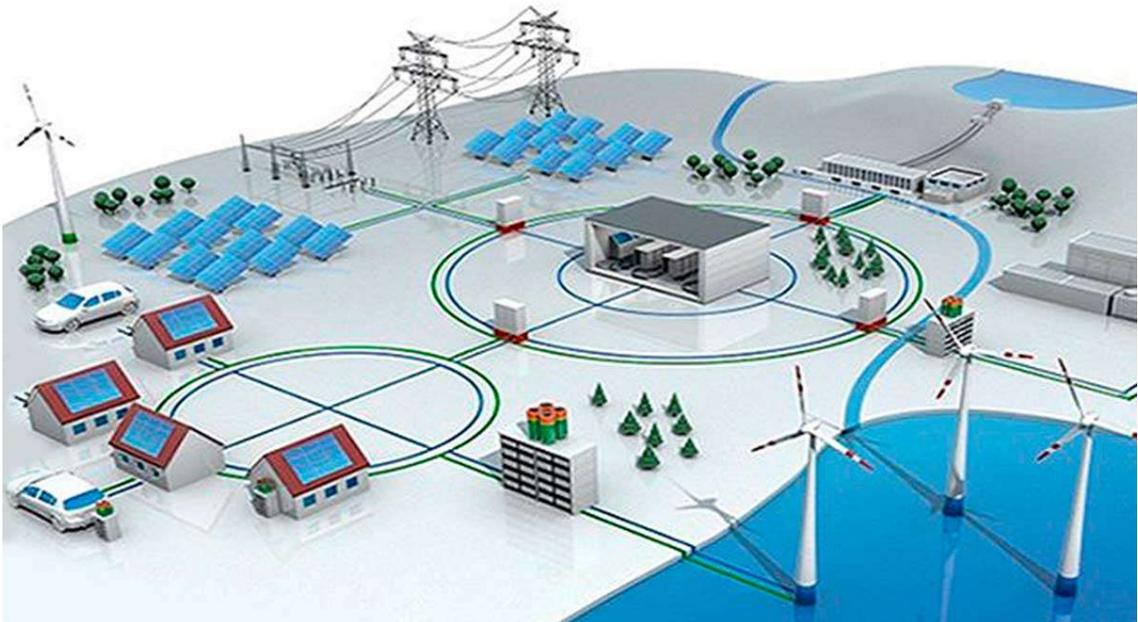


Figura 1-1 Ilustración de generación distribuida. Fuente: Universidad de León.

- **Energías Renovables:** Aunque la generación distribuida no se debe asociar siempre a una fuente de energía limpia tal y como se ha mencionado anteriormente. Sí es cierto que se suele tratar de generación de energía mediante energías renovables, ya que son las más adecuadas para situarse cerca de los puntos de consumo. Un ejemplo de este tipo de generación son las placas fotovoltaicas colocadas en las viviendas actuales. Este tipo de autoconsumo se encuentra en auge y cada vez se hace más habitual encontrarlo en las nuevas viviendas. [2]

Otro concepto que es necesario mencionar antes del desarrollo de este proyecto fin de grado es el coche eléctrico, ya que su aparición ha sido clave para que aparezca el interés para desarrollar dicha investigación. El coche eléctrico contribuye al concepto de generación distribuida ya que no solo sirve como elemento de consumo de energía, sino que también puede funcionar como inyección de potencia a la red desde un punto de consumo cuando sea necesario. Muchas son las ventajas que aporta este elemento tanto a la red eléctrica como a la propia calidad de vida humana, entre ellas se encuentran las siguientes: [3] [4]

- **Reducción de gases de efecto invernadero:** Tanto en España como en Europa es muy considerable el consumo de energía por parte del sector transporte y si a esto se le suma que la mayoría de esta energía proviene de combustibles fósiles, lo convierte en un problema que debe estar en el ojo de mira. Por este motivo, el coche eléctrico se considera una buena opción para la reducción de emisiones de efecto

invernadero, es un buen arma contra la lucha de emisiones de CO2. En la Figura 1-3 se puede observar cómo más del 37% del consumo de energía eléctrica final de España va al sector transporte y tal y como ha sido mencionado anteriormente, en la Figura 1-4. se ratifica que la mayor parte del combustible dedicado a transporte proviene de combustibles fósiles. [3] [4]



Figura 1-2 Consumo de energía final por sectores. Unión Europea vs España. Fuente: AleaSoft Energy Forecasting.

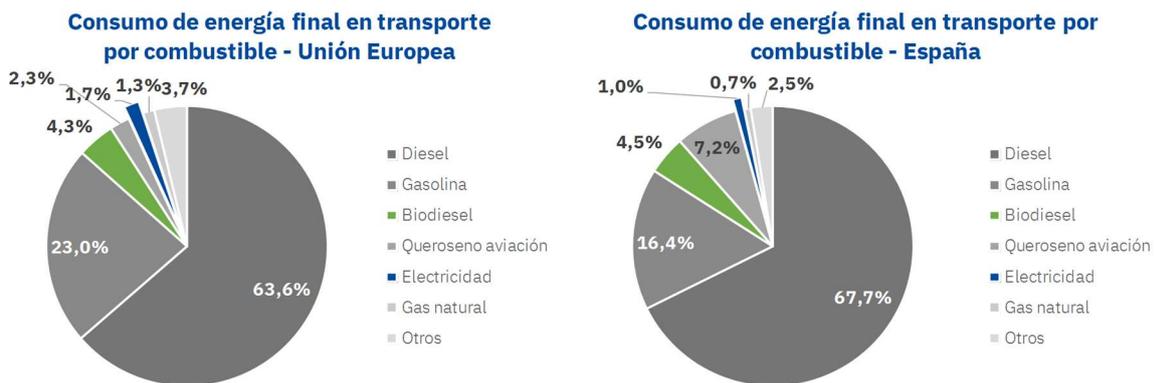


Figura 1-3 Consumo de energía final en el sector transporte por combustible. Unión Europea vs España. Fuente: AleaSoft Energy Forecasting.

- **Aportación de flexibilidad a la red eléctrica:** El vehículo eléctrico aporta la posibilidad de poder funcionar como consumo y como inyección a la red. De esta manera podría cargarse en las horas valle aplanando así la curva de demanda y si fuera preciso también podría inyectar potencia en la red si fuera preciso. [3] [4]

Es por todo lo citado anteriormente por lo que el coche eléctrico forma parte de la generación distribuida, él funciona como carga o como generación en un punto tradicionalmente de consumo.

Para comprender el análisis es necesario entender qué es una red híbrida, esto es debido a que la generación distribuida puede hacer que la red de estudio se convierta en una red híbrida. Para entender este hecho es necesario el concepto de red híbrida:

Se entiende como red híbrida a una red que cuenta con generación eléctrica a través de dos o más fuentes diferentes, generalmente una de ellas es fotovoltaica y por tanto se conectan circuitos de continua a la red. De tal manera un consumidor de una red híbrida puede consumir energía fotovoltaica cuando brille el sol y energía captada de la red en las horas nocturnas, por ejemplo. [5]

La ventaja de la red híbrida es conseguir integrar generación renovable y baterías directamente a la red mejorando así la eficiencia de esta.

1.1 Motivación

Anteriormente se han mencionado solo puntos positivos de la aparición de la generación distribuida y del coche eléctrico y esta no es la completa realidad. Es cierto que son grandes las ventajas que aportan, pero también es cierto que ponen a prueba al modelo de red eléctrica tal y como se conocía hasta el momento. En este esquema el punto de partida siempre eran las grandes generadoras y los que quedaba aguas abajo siempre eran los puntos de consumo. Pero con esta aparición, el modelo cambia encontrando generaciones aguas abajo por parte de la generación distribuida y grandes puntos de consumo por parte del vehículo eléctrico, para lo que la red tal y como la conocemos no estaría preparada. Esto implicaría sobrecargas en la red y por tanto aumento de fallos en el Sistema. Por este motivo sería necesaria la implantación de protecciones direccionales en sustitución de las unidireccionales instaladas actualmente y aconsejadas para un flujo unidireccional como el que se había conocido hasta hace pocos años. [3] [4]

La mejora de la distribución del flujo de carga tal y como se está desarrollando en la actualidad ha sido la principal motivación para el Desarrollo de este Proyecto fin de grado ya que cada vez será más bidireccional el flujo y con ello, mayores serán los problemas para adaptarlo a la red eléctrica actual.

1.2 Objetivos

El objetivo de este estudio consiste en proporcionar una mayor eficiencia a una red que cumpla con los requisitos de la futura red de distribución, es decir, donde el flujo de carga no es unidireccional sino bidireccional. Se estudiará una red compuesta por pequeñas generaciones, batería, nudo Slack y pequeños consumos. De esta manera se comprobará cuál debe ser el funcionamiento de cada elemento para que se produzcan las menores pérdidas posibles. Teniendo como objetivo el uso eficiente de la energía y por tanto de la red eléctrica.

Todo esto se desarrolla con el programa GAMS, herramienta que permite modelar problemas de optimización tanto lineales como no lineales. [6]

2 FORMULACIÓN TEÓRICA DEL OPTIMAL POWER FLOW

En los apartados siguientes se va a aportar una visión teórica y general del análisis desarrollado en este proyecto fin de grado. Definiendo así los términos de mayor relevancia y la estructuración del análisis, llegando por último a casos concretos aumentando la complejidad de estos durante la investigación.

2.1 Restricciones de igualdad en el OPF

El punto de partida del análisis es la representación de manera matemática de la red a estudiar y la obtención del flujo de carga.

Cuando se habla de flujo de carga, se entiende por este, a la herramienta numérica que permite conocer el estado de una red eléctrica trifásica en diferentes periodos de tiempo o situaciones. Es decir, partiendo de parámetros que definen una red eléctrica y de una situación inicial se podría conocer la respuesta de esta red frente a determinados cambios.

Esta respuesta se consigue mediante procedimientos iterativos, siendo los siguientes métodos los más comunes:

- Método de Gauss-Seidel.
- Método de Newton-Raphson.
- Métodos desacoplados.

Para elaborar dicho análisis es preciso distinguir entre parámetros y variables:

- **Parámetros.** Son aquellos elementos que definen la red que se procede a analizar. Son datos del problema.
 - **Admitancia (Y):** Se define como la facilidad de paso de una corriente alterna por un circuito eléctrico. Está compuesta por la conductancia (G), como parte real y por la susceptancia (B) como parte imaginaria. Su unidad de medida es el Siemens. [7]
$$Y = \frac{1}{Z} = G + B j$$
 - **Potencias activas (P_{carga}) y reactivas (Q_{carga}) consumidas** en cada nudo de la red.
 - **Potencias activas (P_{gen}) y reactivas (Q_{gen}) generadas** en cada nudo de la red.
 - **Parámetros de los equipos activos conectados a la red.**
 - **Rendimiento de carga de la batería (η_c).** Limita la capacidad de la batería para cargarse.
 - **Rendimiento de descarga de la batería (η_d).** Limita la capacidad de la batería para descargarse.
 - **Energía almacenada por la batería (E).** Se entiende como la energía que la batería es capaz de almacenar.
 - **Resistencia de la línea de continua (R_{dc}).** Este parámetro hace que aparezca o desaparezca la línea de continua en el análisis ya que la línea se elimina dándole a este parámetro un valor muy cercano a cero.
 - **Potencia máxima de la batería (Pmax).** Permite delimitar la potencia de la batería.
- **Variables.** Dichas variables se adaptan a las diferentes situaciones propuestas por los parámetros y permiten ver cómo reacciona la red ante estas variaciones. Las variables pueden ser muchas, todo depende de lo que se desee analizar. Las más comunes son:
 - **Módulo de tensiones (V)** en cada nudo.
 - **Ángulo de tensiones (θ)** en cada nudo.

- **Flujo de potencias (P) y (Q).**
- **Sumatorio de pérdidas por todas las líneas ($P_{pérdidasT}$)**
- **Sumatorio de pérdidas de todas las líneas durante todos los instantes de tiempo ($P_{pérdidas}$)**
- **Intensidades de líneas (I).**
- **Variables de la batería.**
 - **Potencia de carga (P_c).** Es la potencia cargada por la batería.
 - **Potencia de descarga (P_d).** Es la potencia descargada por la batería.
 - **Intensidad por la línea de continua (i_{dc})**
 - **Variable binaria que se posiciona a 1 cuando la batería carga (α_c)**
 - **Variable binaria que se posiciona a 1 cuando la batería descarga (α_d)**
 - **Estado de la batería (soc).** Proporciona el estado en el que se encuentra la batería.

El procedimiento para iniciar el desarrollo del flujo de carga estudiado es el siguiente:

1. Obtención de datos: En este caso sería P_{gen} , P_{carga} , E...
2. Construcción de las matrices B y G partiendo de los valores de impedancia de las líneas
3. Elección del nudo Slack. Este será el nudo tomado como referencia.
4. Desarrollo del flujo de carga

Para llevar a cabo dicho procedimiento se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones:

2.1.1 Obtención de datos

Estos son los datos de partida por lo que no requieren de ninguna ecuación para su obtención, la única particularidad que presentan es que todos los datos que aparecen en el estudio es que están en por unidad. Para ello es necesario obtener el valor de tensión base. Teniendo en cuenta que se está estudiando la red conectada al devanado secundario del transformador, el cálculo de la tensión base del circuito se calcula de la siguiente manera:

$$V_{B2}[kV] = V_{T1} * \frac{V_{T2}}{V_{T1}} = V_{T2}$$

Siendo V_{B2} la tensión base por el circuito conectado al segundo devanado del transformador, V_{T1} la tensión nominal en el primer devanado y V_{T2} la tensión nominal en el segundo devanado.

El valor de potencia base, es decir, S_B viene definido, no es un valor calculado. A diferencia del valor de impedancia base, sí requiere de una ecuación que depende de la tensión y la potencia base.

$$Z_{B2} [\Omega] = \frac{V_{B2} * V_{B2}}{S_B}$$

Una vez obtenidos todos los valores base, se pasan todos los datos del análisis a por unidad.

$$S_{ij}[p.u.] = \frac{S_{ij}[MW]}{S_B}$$

$$Z_{ij} [p.u./km] = \frac{Z_{ij} [\Omega/km]}{Z_{B2} [\Omega]}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

2.1.2 Construcción de las matrices B y G

Teniendo en cuenta que los valores de partida son las impedancias en Ω/km y la longitud de cada línea en km. La obtención de cada componente de las matrices B y G se obtiene con la siguiente ecuación.

$$Y_{ij} \left[\frac{1}{p.u.} \right] = \frac{1}{Z_{ij} \left[\frac{p.u.}{km} \right] * L_{ij} [km]} = (G_{ij} + jB_{ij})$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Con este último calculo se termina de definir matemáticamente la red.

2.1.3 Elección del nudo Slack

Para todos los análisis se selecciona como nudo Slack el nudo que conecta la red de estudio con el el transformador. Dicho nudo es el nudo de referencia y por tato toma los siguientes valores.

$$V_{Slack} = 1 pu$$

$$\theta_{Slack} = 0^\circ$$

2.1.4 Desarrollo del flujo de carga

Una vez obtenidos todos los datos mencionados anteriormente y teniendo en cuenta que se ha decidido trabajar en todo momento con valores en por unidad (pu) por simplicidad, se comienza el proceso iterativo, siendo la ecuación a iterar, el balance de potencias:

$$P_i + jQ_i = V_i \sum_{j=1}^n [G_{ij} + jB_{ij}] V_j^*$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Separando la parte real de la imaginaria quedaría de la siguiente manera:

$$P_i = P_{gen,i} + P_{carga,i} = V_i \sum_{j=1}^n V_j * (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j))$$

$$Q_i = Q_{gen,i} + Q_{carga,i} = V_i \sum_{j=1}^n V_j * (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j))$$

En las siguientes ecuaciones el término de la izquierda sería el balance de potencias que hemos considerado dato, es decir, sería el balance entre la potencia generada y consumida por la red. Mientras que a la derecha se encuentran los términos que hemos considerado variables, V y θ , estos irán variando en cada iteración hasta llegar a un valor que converja a unos límites definidos previamente. Los términos V y θ irán variando a excepción de los pertenecientes al nudo Slack, ya que como se ha mencionado anteriormente son valores definido. De esta manera, quedaría definido el flujo de potencia.

En este balance de potencia posteriormente entrarán en juego, además del nudo Slack, la generación y las cargas

ya consideradas, la batería y la generación fotovoltaica.

En el caso de la generación fotovoltaica no se incluye ninguna variación en la ecuación ya que se considera una generación normal con la excepción de aportar valor nulo de potencia reactiva.

Sin embargo, la aparición de la batería hace que la ecuación de potencia activa se vea modificada tal y como se representa a continuación.

$$\begin{aligned}
 P_i(t) &= P_{gen,i}(t) + P_{carga,i}(t) + P_{convertidor,i=k}(t) \\
 &= V_i(t) \sum_{j=1}^n V_j(t) * (G_{ij} \cos(\theta_i(t) - \theta_j(t)) + B_{ij} \sin(\theta_i(t) - \theta_j(t))) \\
 & \quad t = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned}$$

Siendo k el nudo donde se encuentra situada la batería y t el horizonte temporal considerado.

La ecuación de potencia reactiva no se ve afectada ya que la batería no aporta potencia reactiva pero sí que al incluir la batería se provoca que el estudio se haga en diferentes instantes de tiempo y por tanto el balance de potencia reactiva pase a depender del tiempo.

$$\begin{aligned}
 Q_i(t) &= Q_{gen,i}(t) + Q_{carga,i}(t) = V_i(t) \sum_{j=1}^n V_j(t) * (G_{ij} \sin(\theta_i(t) - \theta_j(t)) - B_{ij} \cos(\theta_i(t) - \theta_j(t))) \\
 & \quad t = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned}$$

Al verse modificado el balance de potencia activa es necesario definir la potencia del convertidor.

$$\begin{aligned}
 P_{convertidor,i=k}(t) &= -P_c(t) + P_d(t) - 2 * R_{dc} * i_{dc}(t) * i_{dc}(t) \\
 P_c(t) &= i_{dc}(t) * V_{bat}(t) * \alpha_c(t) \\
 P_d(t) &= -i_{dc}(t) * V_{bat}(t) * \alpha_d(t) \\
 i_{dc}(t) &= \frac{V_k(t) * 2/Duty - V_{bat}(t)}{2 * R_{dc}} \\
 & \quad t = 1, 2, \dots, m \\
 Duty &= \frac{2}{1,41}
 \end{aligned}$$

Dentro del flujo de cargar se calculan las intensidades de ramas y el estado de la batería ya que son valores interesantes para el estudio.

$$\begin{aligned}
 I_{ij}^2(t) &= (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) * (V_i^2(t) + V_j^2(t) - 2 * V_i(t) * V_j(t) * \cos(\theta_i(t) - \theta_j(t))) \\
 I_{ij}(t) &= I_{ij}^2(t) \\
 soc(t) &= soc(t - 1) + P_c(t) * \eta_c - \frac{P_d(t)}{\eta_d} \\
 & \quad t = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned}$$

2.2 Restricciones limitantes en el OPF

Todos los análisis estudiados llevan las mismas restricciones para de esta manera poder comparar los diferentes escenarios.

Estas restricciones son las siguientes:

- Restricción de tensión: Se define un límite alto y bajo para la tensión de todos los nudos. Para el

desarrollo de un problema iterativo es preciso partir de unos valores iniciales y restringir el rango de las iteraciones, por ello es precisa esta restricción.

$$0,45 \leq V_i(t) \leq 1,5$$

- Restricción del ángulo de tensiones: Esta restricción cumple la misma función que la anterior, limita el rango de iteraciones y aporta un valor inicial.

$$-\pi \leq \theta_i(t) \leq \pi$$

- Restricción de la potencia de carga y descarga de la batería: Esta restricción hace que la batería se acerque a la realidad aportándole un límite de carga y descarga. Consta de un nivel alto y un nivel bajo impidiendo así que la batería pueda cargarse o descargarse sin respetar este rango.

$$0 \leq P_c(t) \leq P_{max}$$

$$0 \leq P_d(t) \leq P_{max}$$

- Restricción del estado de la batería: Esta restricción cumple la misma función que la anterior, impide que el estado de la batería sobrepase la delimitación que marca su límite de energía de almacenamiento.

$$0 \leq soc(t) \leq E$$

- Restricción del estado inicial: La batería está obligada a comenzar el estudio en el mismo estado siempre.

$$soc(t_0) = E$$

2.3 Función objetivo del OPF

La función objetivo del análisis se escoge según donde se desee poner el foco de estudio, en este caso, lo que interesa es conseguir una red eléctrica con la mayor eficiencia posible y por tanto se ha elegido como función objetivo la minimización del sumatorio de pérdidas de la propia red.

Este es un estudio de interés ya que consiste en aprovechar al máximo los recursos energéticos, desperdiciándolos lo menor posible durante su transporte.

Durante este análisis se puede observar cómo dependiendo de la situación de generación y consumo de la red, es más interesante o menos el uso de la batería o del nudo Slack como método de inyección o consumo.

La fórmula de partida es la clásica fórmula para el cálculo de pérdidas.

$$P_{pérdidas} = R I^2$$

Aplicando dicha fórmula a OPF estudiado se obtiene:

$$P_{pérdidas}(t) = i_{dc}^2(t) * R_{dc} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{I_{ij}^2(t) * R_{ij}}{2}$$

$$P_{pérdidas} = \sum_{t=0}^{t=m} (i_{dc}^2(t) * R_{dc} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{I_{ij}^2(t) * R_{ij}}{2})$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$t = 1, 2, \dots, m$$

De esta manera se obtiene la función objetivo a estudiar, dicha función no cuenta con valor de i_{dc} en la situación sin batería por lo que el primer término de dicha ecuación no es tenido en cuenta para dicha situación.

3 VALIDACIÓN DEL MODELO

3.1 Flujo de carga de la red de 4 nudos

Para validar el modelo se procede a evaluar el algoritmo propuesta en una red pequeña, red de 4 nudos.

Esta red consta de 1 nudo slack (1) y 3 nudos a los que se conectan cargas (2, 3 y 4).

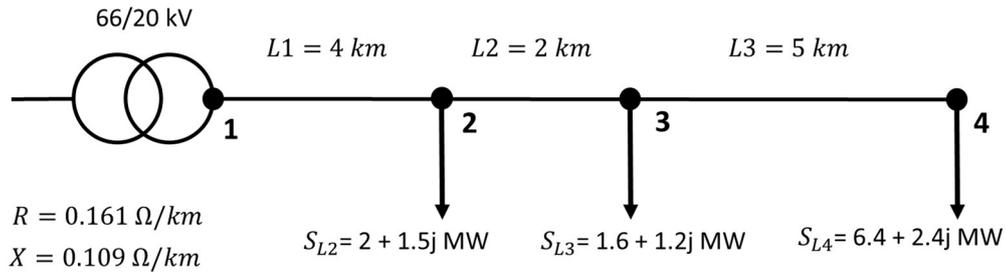


Figura 3-1 Red de 4 nudos.

En el siguiente estudio se trabaja en por unidad, por lo que es necesario pasar los datos a esta unidad de medida. Para ello se ha considerado que el valor de tensión base es 20 kV y el de potencia 1 MW.

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(20 * 10)^2}{10^6} = 400 \Omega$$

Dividiendo los datos de partida entre los parámetros base se obtienen los valores de la red en p.u.

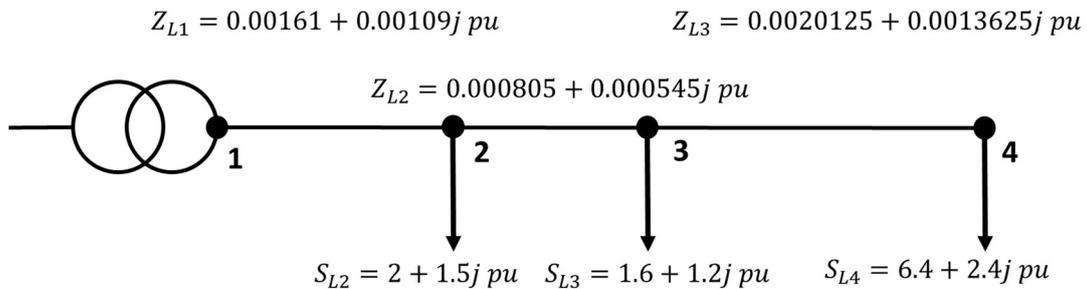


Figura 3-2 Red de 4 nudos en por unidad.

Una vez conseguidos los valores en por unidad se puede obtener la matriz de admitancias de las ecuaciones de nudos de donde se obtiene la parte real (G) e imaginaria (B) de las restricciones de igualdad del flujo de carga.

$$G = \begin{bmatrix} 425.9034 & -425.9034 & 0 & 0 \\ -425.9034 & 1277.7102 & -851.8068 & 0 \\ 0 & -851.8068 & 1192.5295 & -340.7227 \\ 0 & 0 & -340.7227 & 340.7227 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -288.3445 & 288.3445 & 0 & 0 \\ 288.3445 & -865.0336 & 576.6891 & 0 \\ 0 & 576.6891 & -807.3647 & 230.6756 \\ 0 & 0 & 230.6756 & -230.6756 \end{bmatrix}$$

Observando los valores de potencia de los nudos se aprecia que es una red de consumidores, este dato es bueno tenerlo en cuenta a la hora de observar los resultados obtenidos de las variables.

Por último, el análisis se hace evolutivo a lo largo del tiempo para ello se modifican las cargas a lo largo del tiempo por 0,1 en t0, 1,5 en t1, 0,9 en t2, 1,2 en t3 y 1,15 en t4. De esta manera se obtienen los resultados que se muestran a continuación.

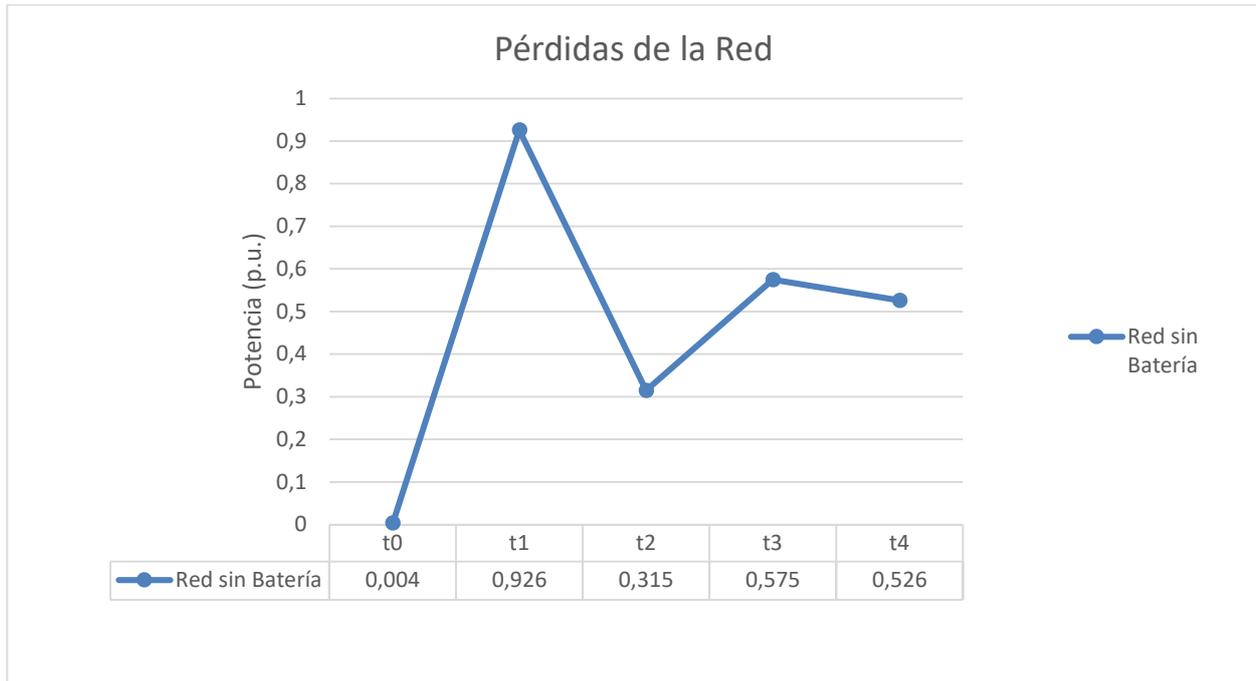


Figura 3-3 Resultado del sumatorio de pérdidas por ramas en la red de 4 nudos sin batería

En el desarrollo del flujo de carga sin batería, la función objetivo toma como valor 2,346 p.u. El valor de las pérdidas de la red a lo largo del tiempo se representado en la figura 3-3.

Durante el primer periodo de tiempo las pérdidas son casi nulas, esto es debido a que en este momento la demanda de cargas es muy baja y, por tanto, no es necesario que circule tanta energía por la red y por consiguiente no tiene sentido que el valor de pérdidas sea elevado.

El resto de periodos de tiempo también coinciden con la evolución de las cargas, este hecho es debido a que la red estudiada es una red puramente de clientes. El único punto de generación es el nudo Slack.

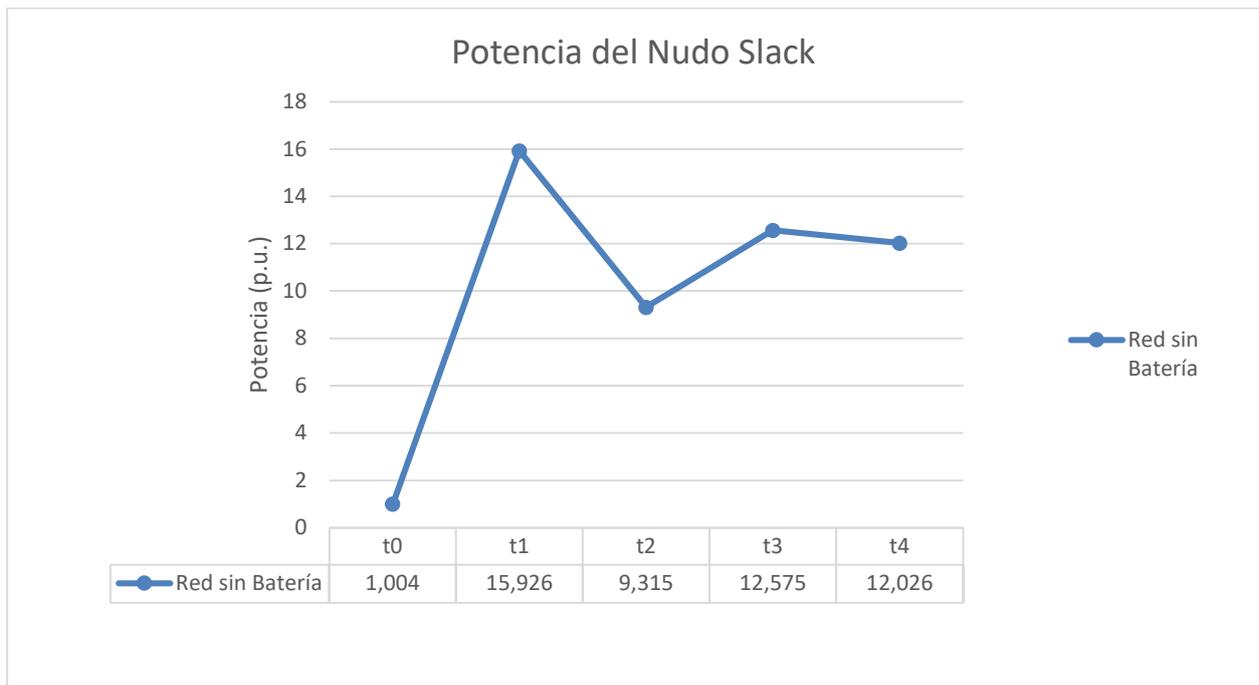


Figura 3-4 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de 4 nudos sin batería

En la figura 3-4 se aprecia la misma evolución que se ha observado en la figura 3-3. Al ser una red de clientes el nudo Slack es el que abastece a todas las cargas y por tanto su funcionamiento dependerá de la demanda de estas, a mayor carga mayor absorción de potencia en dicho nudo.

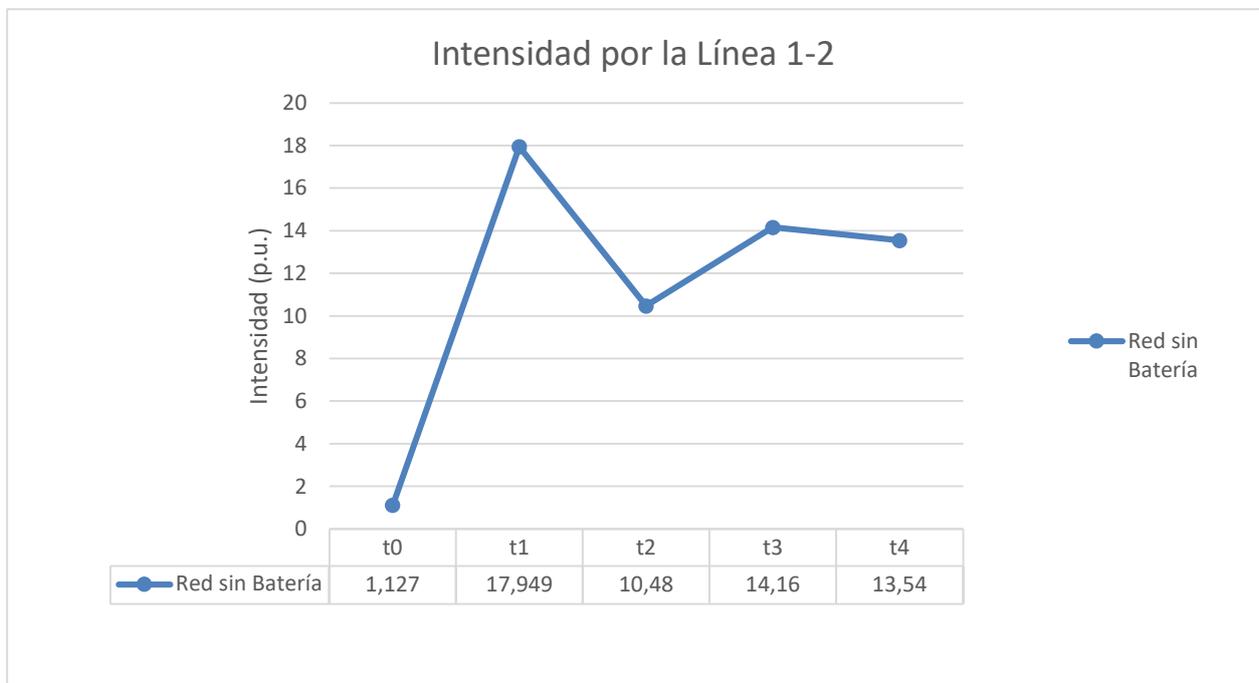


Figura 3-5 Resultado de la intensidad por la línea 1-2 en la red de 4 nudos sin batería

La línea representada en la figura 3-5 conecta el nudo Slack con las cargas por lo que la intensidad que circula por ella coincide con la misma evolución que presenta la potencia del nudo Slack.

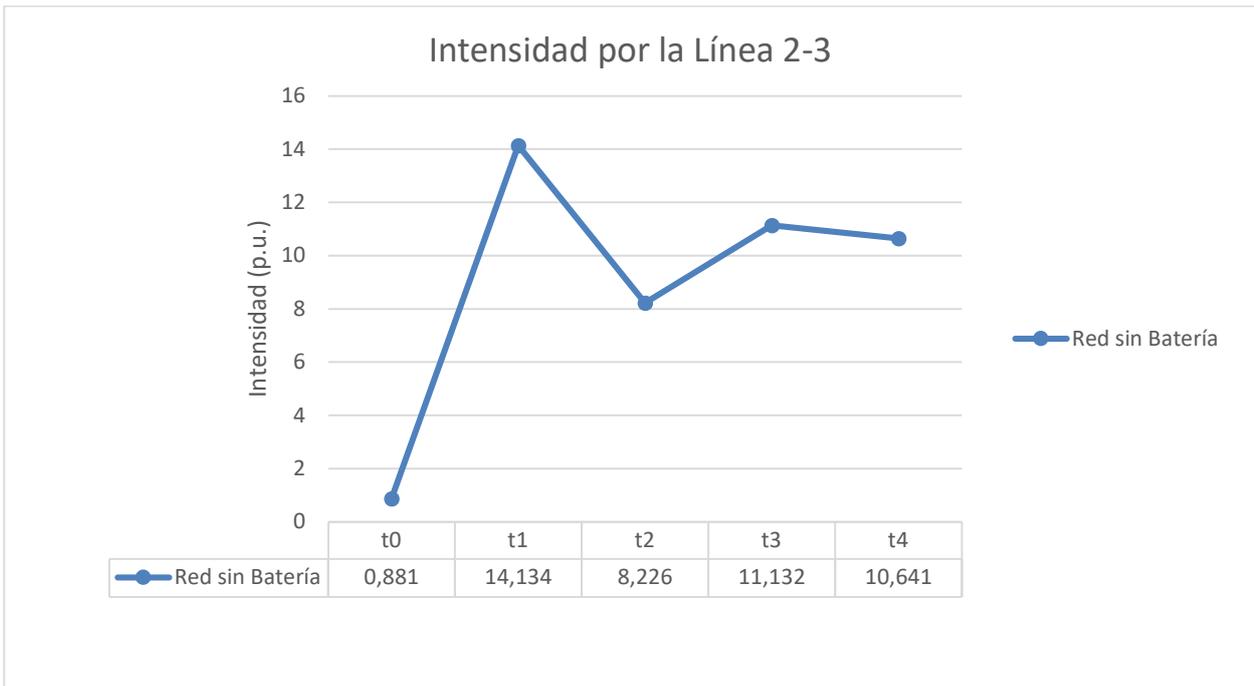


Figura 3-6 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de 4 nudos sin batería

La evolución a lo largo del tiempo de la figura 3-6 sigue coincidiendo con la evolución que se ha estado viendo hasta el momento debido a la dependencia de las cargas. Lo destacable de esta línea respecto a la representada en la figura 3-5 es que adquiere menores valores de intensidad que esta última. Esto es debido a dicha línea se encuentra más alejada de la generación, nudo Slack, que la anterior.



Figura 3-7 Resultado de la intensidad por la línea 3-4 en la red de 4 nudos sin batería

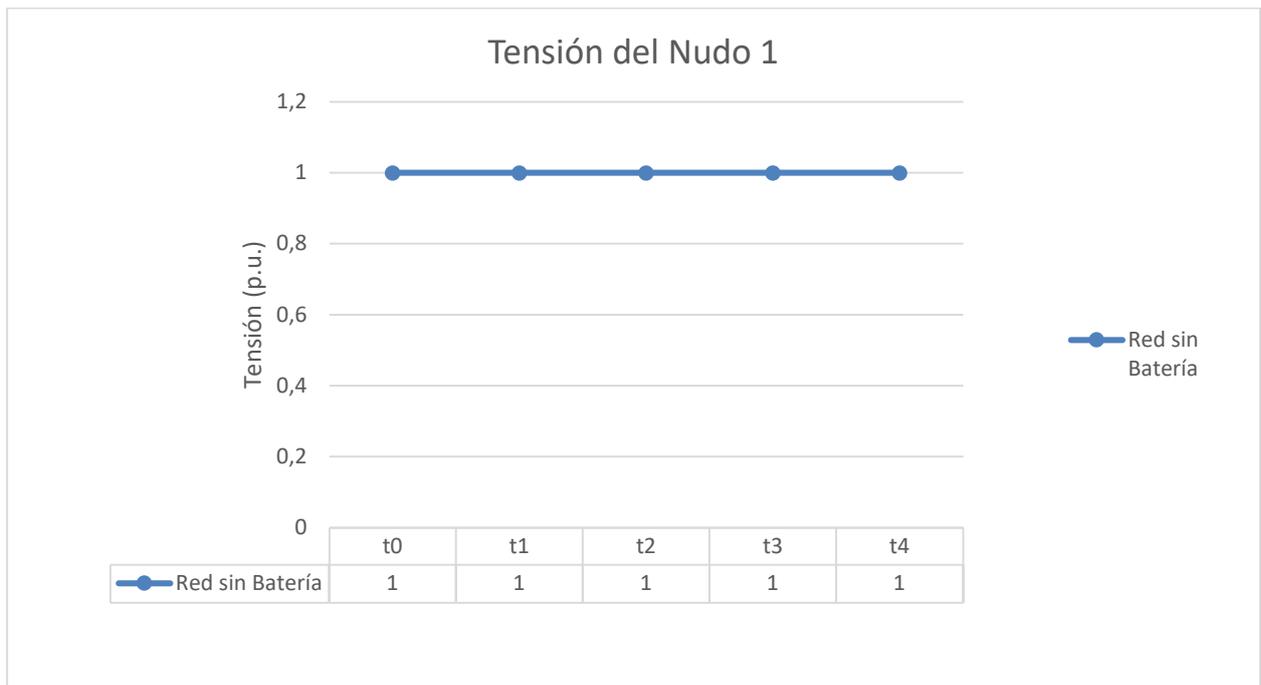


Figura 3-8 Resultado de la tensión en el nudo 1 en la red de 4 nudos sin batería

Tal y como se ha comentado con anterioridad, el nudo Slack elegido ha sido el 1 y por tanto se le ha forzado a que tenga como valor de tensión 1 p.u. Esto es lo que observa en la figura 3-8.

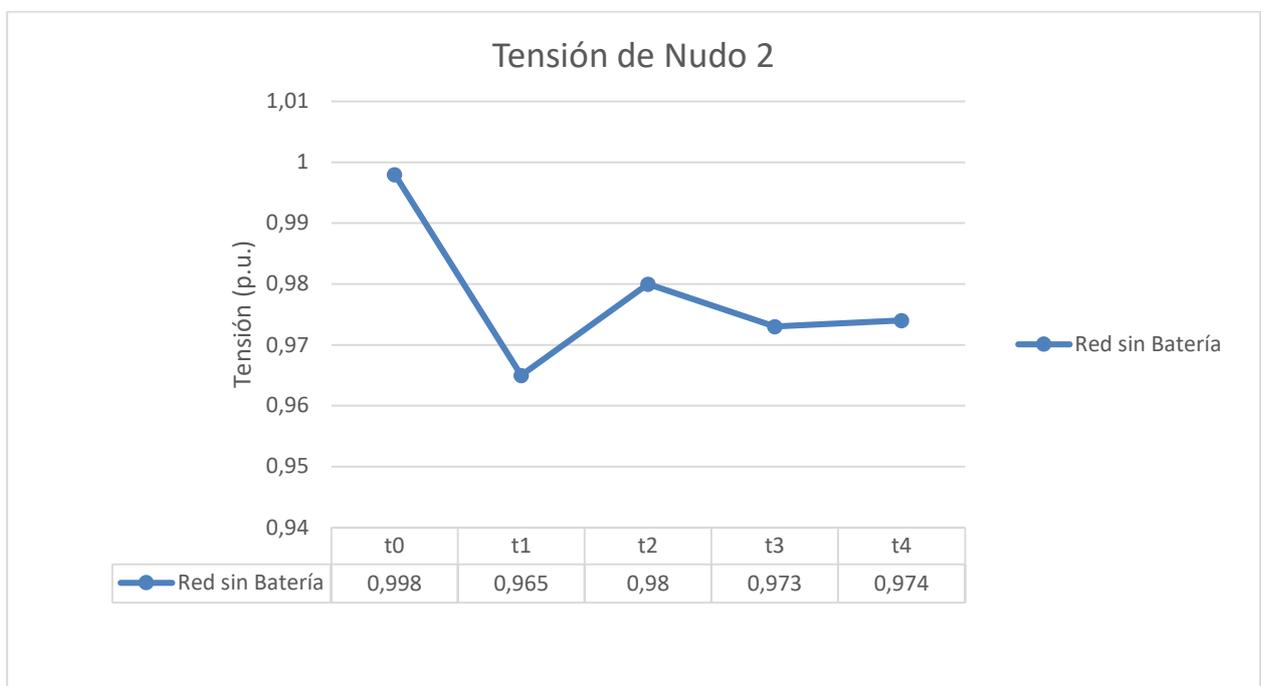


Figura 3-9 Resultado de la tensión en el nudo 2 en la red de 4 nudos sin batería

En la figura 3-9 se representa la tensión del nudo 2 a lo largo de los 4 periodos de tiempo. A dicho nudo se encuentra conectada una de las cargas, por lo que la tensión de acuerdo a ella. En el momento en el que aumenta la carga la tensión cae y en el momento en el que disminuye la carga la tensión sube.

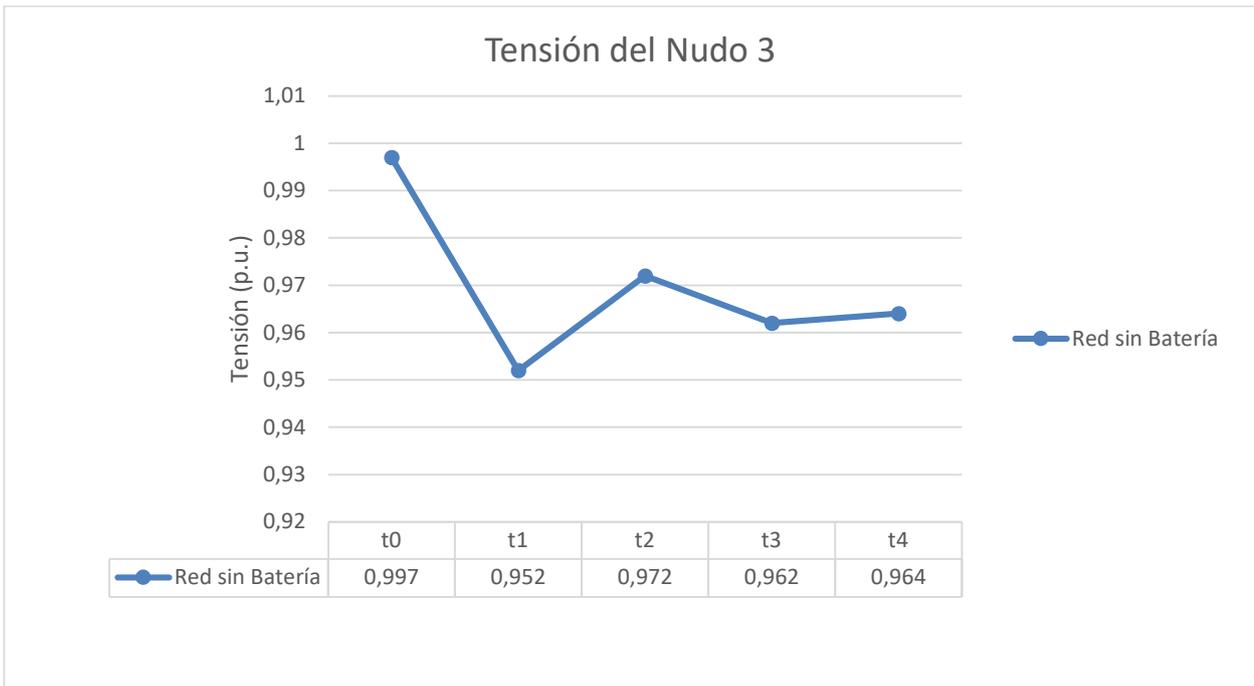


Figura 3-10 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de 4 nudos sin batería

El mismo hecho aparece representado en la figura 3-10 con la única diferencia de obtener valores más pequeños de tensión ya que este nudo está más alejado del nudo Slack.

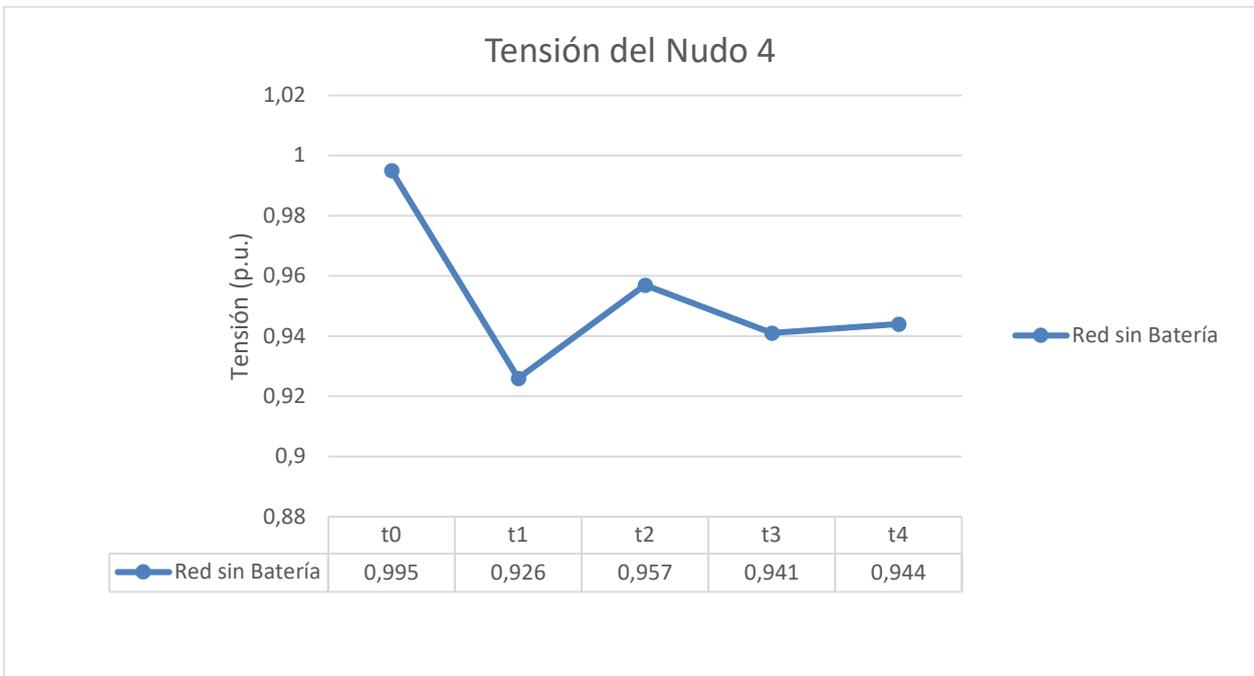


Figura 3-11 Resultado de la tensión en el nudo 4 en la red de 4 nudos sin batería

La figura 3-11 representa el mismo caso anterior aplicado al último nudo de la red, el 4. Por ende los valores son aún más pequeños ya que es el nudo más alejado.

3.2 Conexión de una batería en el nudo 3 de la red de 4 nudo directamente

El escenario a estudiar en el siguiente apartado es el conexionados de una batería en el nudo 3 de la red. Para llevar a cabo el conexionado es necesario un convertidor DC/AC para integrar la batería, este convertidor está directamente colocado en el nudo 3, por lo que se está considerando que la batería está directamente conectada a dicho nudo sin ninguna línea que le sirva de conexión. Esto se puede observar en la figura 3-13.

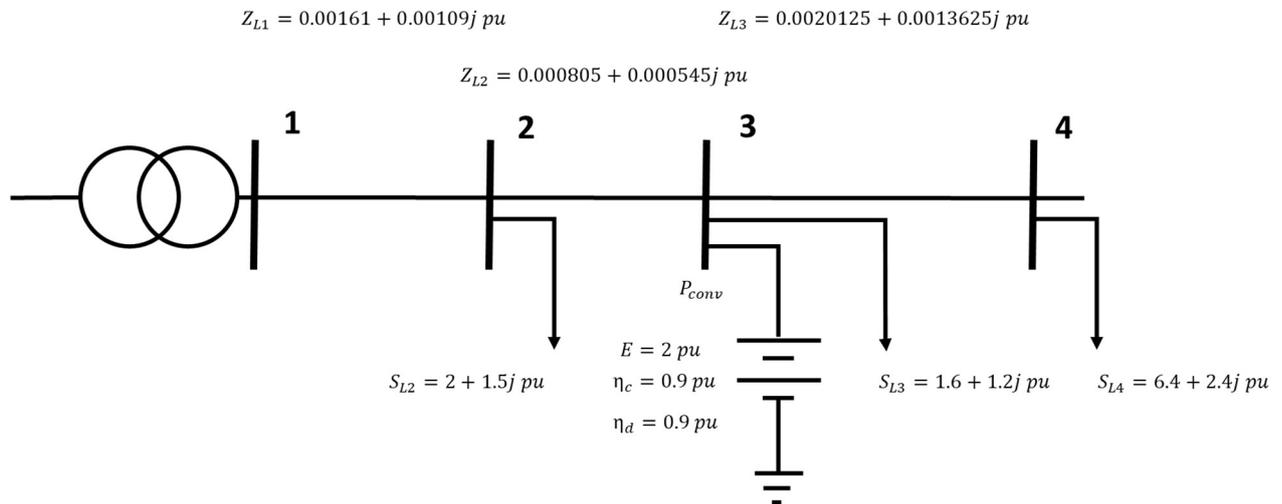


Figura 3-12 Red de 4 nudos con batería

En dicha figura se aprecia cómo además de la carga conectada inicialmente en el nudo 3, ha aparecido la batería junto con todos los parámetros que la definan ya citados en el apartado 2, “Formulación Teórica del Optimal Power Flow”.

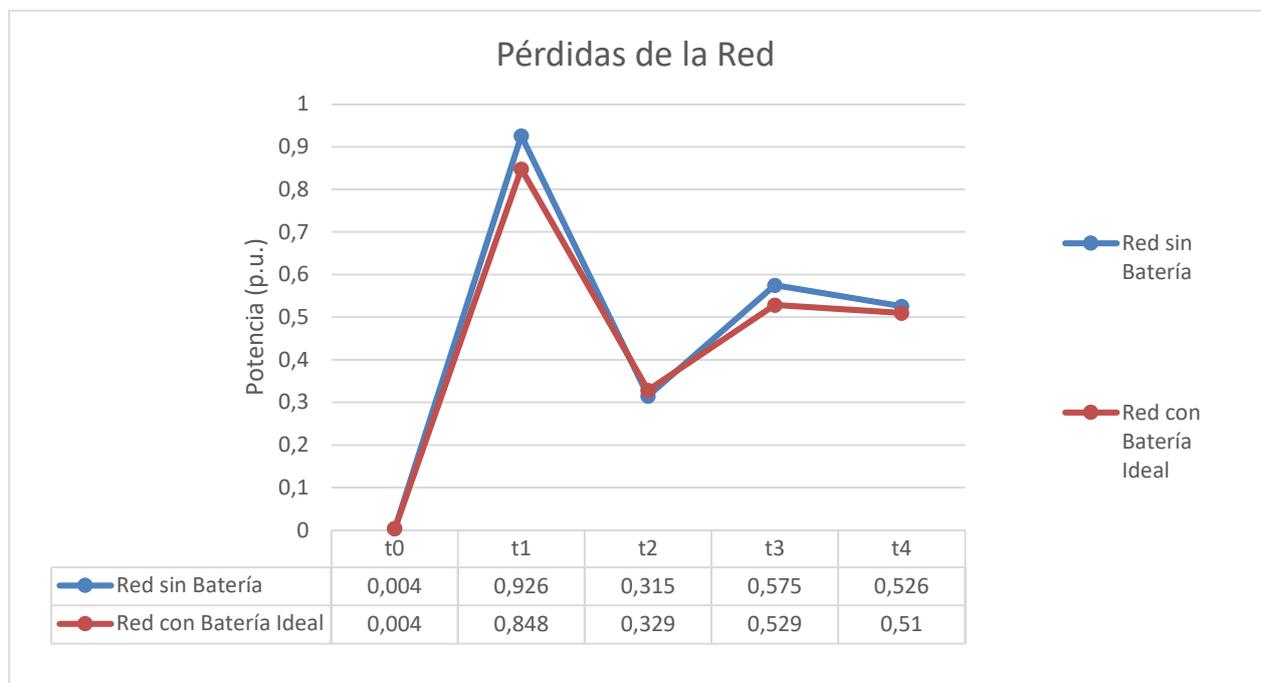


Figura 3-13 Resultado del sumatorio de pérdidas por ramas en la red de 4 nudos sin batería y con batería

Al incluir la batería en la red, la función objetivo pasa a tomar un valor de 2,219 p.u. consiguiendo reducir su valor respecto a la opción sin batería.

Respecto a la evolución de dichas pérdidas a lo largo del tiempo, durante el primer periodo de tiempo t_0 el valor se mantiene igual, este hecho es de esperar ya que la batería está forzada a no funcionar durante este periodo y por tanto, la red con batería se comporta como si esta no existiera.

En el resto de periodos de tiempo se produce un descenso de pérdidas excepto en t_2 , esto significa que la intensidad por la red es mayor que en el escenario sin batería, es decir, la intensidad que está circulando por la red es más de lo que necesitarían las cargas para abastecerse.

Este hecho podría plantear dos hipótesis:

1. Una opción puede ser que el programa de optimización haya considerado necesaria la descarga de energía de la batería. Es decir, que la batería se haya cargado anteriormente hasta su valor máximo de energía y necesite descargarse porque posteriormente necesite actuar en modo carga.
2. La segunda opción consiste en que la batería esté cargándose porque en periodos siguientes necesita descargar mayor energía de la que tiene hasta el momento.

Estas hipótesis serán confirmadas o descartadas a continuación al observar los resultados obtenidos de las variables de la batería.

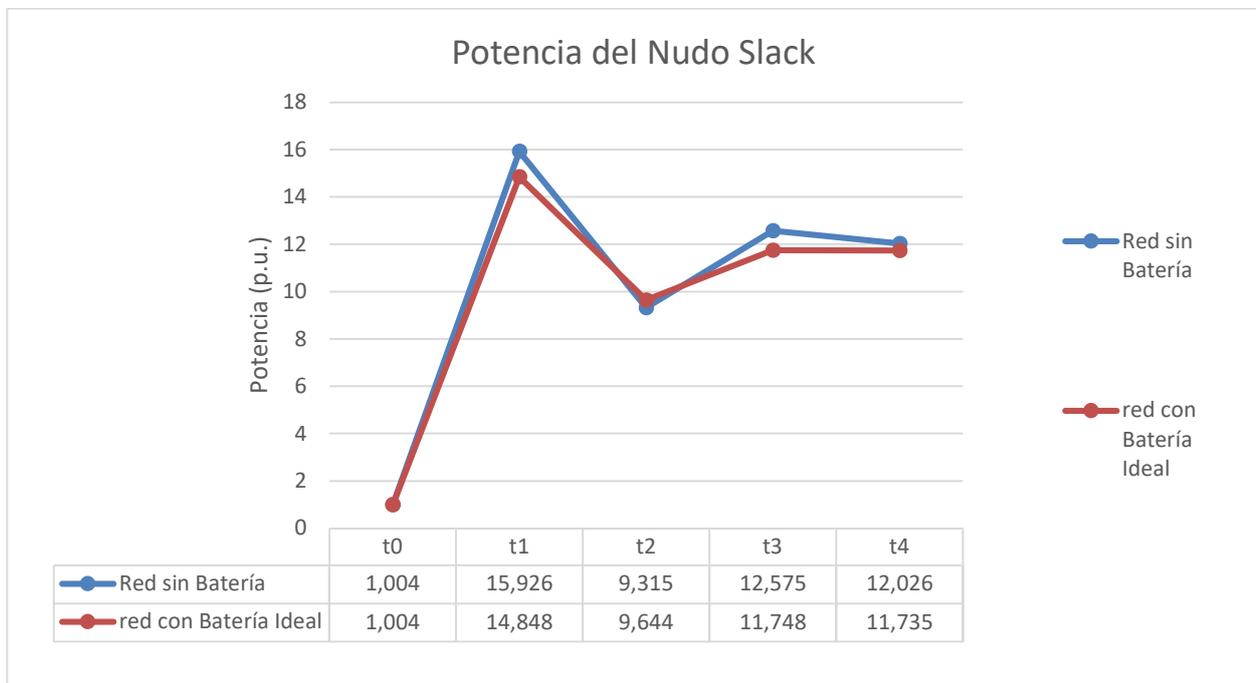


Figura 3-14 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de 4 nudos sin batería y con batería

La potencia del nudo Slack reflejada en la figura 3-15 conlleva la misma evolución en el tiempo que las pérdidas, por tanto, la potencia sigue evolucionando con las cargas, aunque con valores menores a la situación sin batería, excepto en t_2 como ya se ha comentado anteriormente.

Hasta el momento todo hace indicar que la batería está actuando a partir de t_1 .



Figura 3-15 Resultado de la intensidad por la línea 1-2 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

La intensidad por la línea 1-2 representada en la figura 3-16 mantiene el mismo comportamiento, aunque también presenta valores más reducidos, este hecho corrobora que también sea más reducida la potencia del nudo Slack.

Ese último comentario seguiría siendo aplicable a t1, t2 y t4, es decir, en t4 no se reduce su valor.



Figura 3-16 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

La evolución de la intensidad representada en la figura 3-17 también se comporta de la misma manera que la de la figura 3-16. Este hecho no es de destacar ya que como se ha comentado anteriormente, la red foco de análisis es una red de consumidores y el uso de la batería se considera para mejorar dicha situación.



Figura 3-17 Resultado de la intensidad por la línea 3-4 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

Como era de esperar, la evolución de la figura 3-18 sigue coincidiendo con las vistas hasta el momento disminuyendo los valores de intensidad en los periodos t1, t3 y t4 respecto a la opción sin batería ya aumentando dicho valor en t2.

Por tanto, es uso de la batería hace que las intensidades por las líneas 2-3 y 3-4 no tengan que ser necesariamente tan elevadas.



Figura 3-18 Resultado de la tensión en el nudo 1 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

Para una correcta comparación de los escenarios se sigue manteniendo como nudo Slack en nudo 1 y por tanto la tensión de este está definida a 1 p.u.

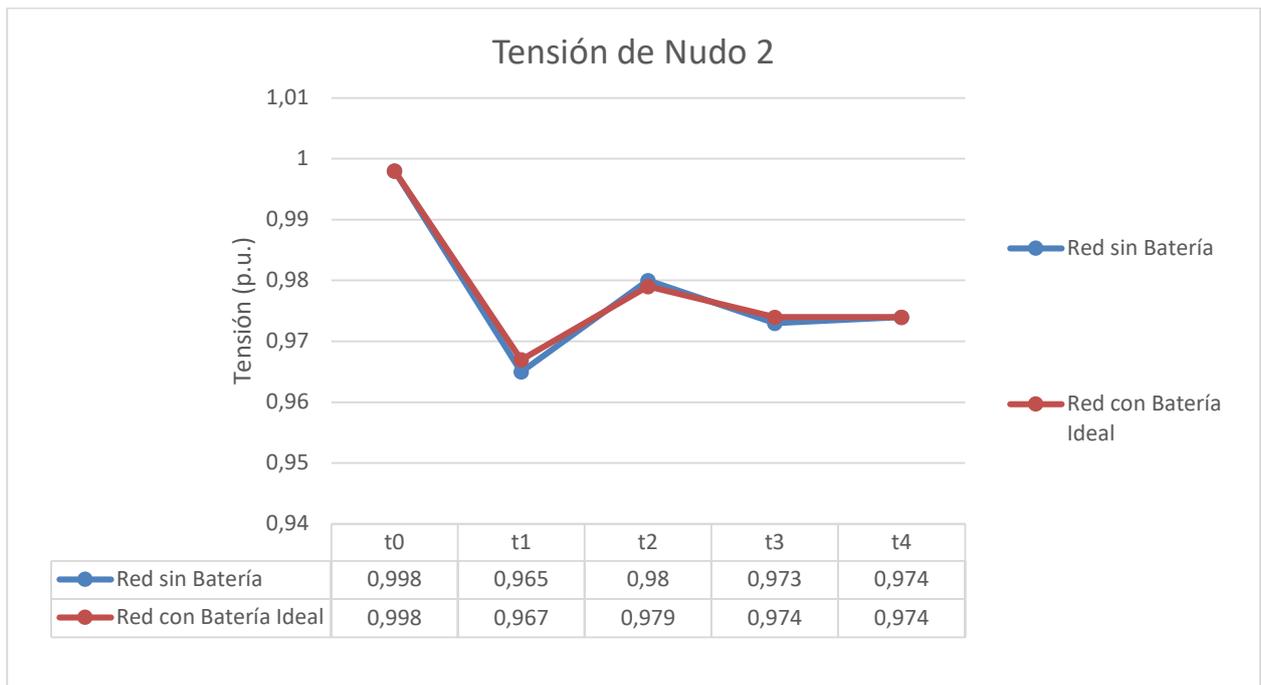


Figura 3-19 Resultado de la tensión en el nudo 2 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

Al ser una red de consumidores las tensiones de los nudos se van a comportar de la misma manera que se ha comentado en el escenario sin batería, la tensión cae a medida que las cargas aumentan.

En la figura 3-20 se observa lo que era de esperar, que los valores de tensión en t1 y t3 han aumentado al disminuir la intensidad.

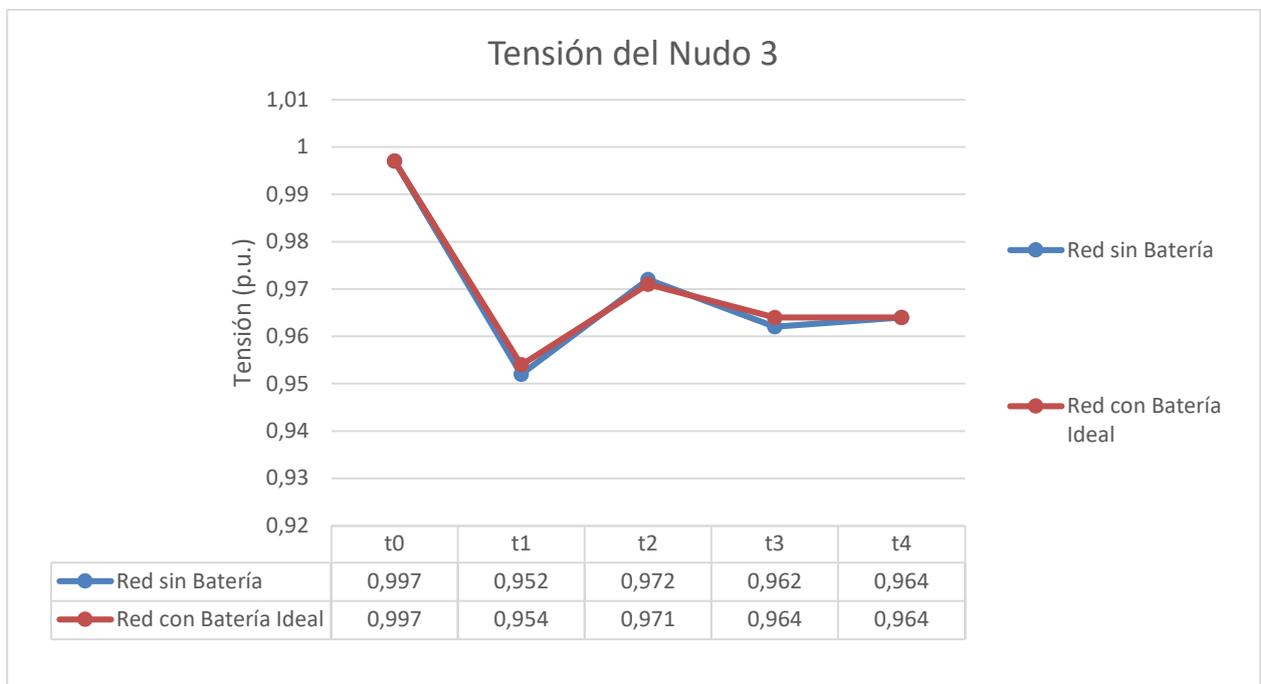


Figura 3-20 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

En el nudo 3 se observa el mismo comportamiento, el nudo abastece su carga conectada, con la única diferencia que aporta la modificación del nivel de intensidad que le llega respecto a la opción sin batería.

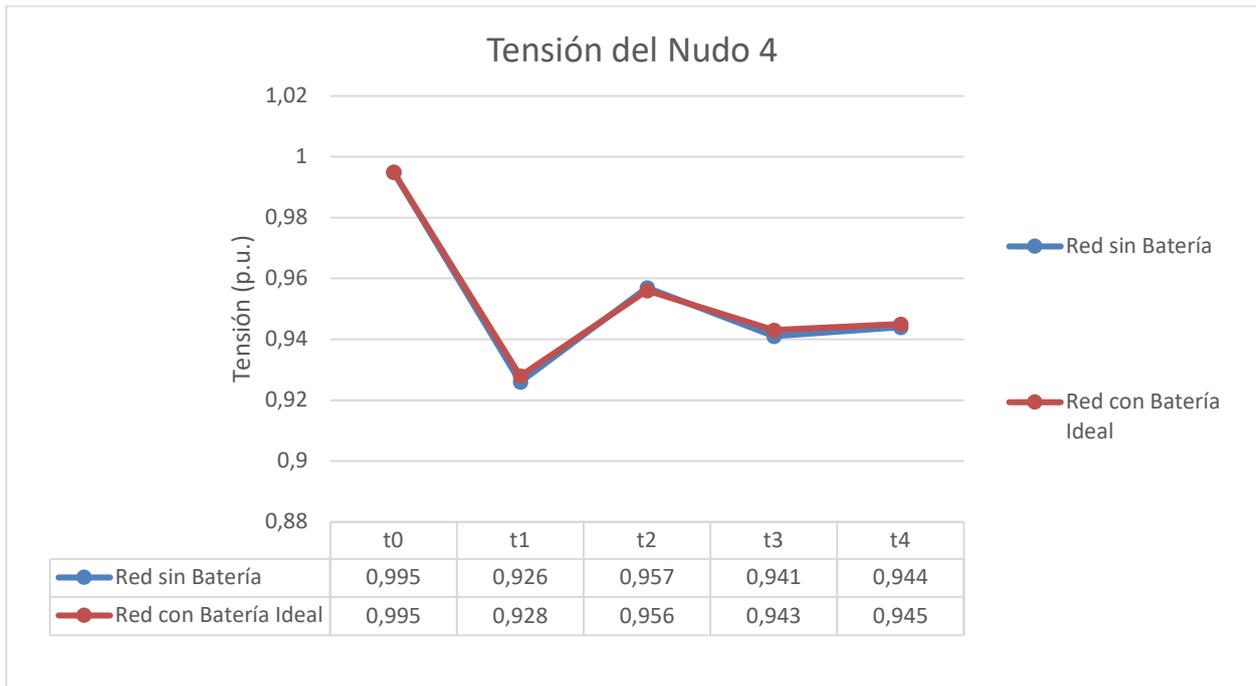


Figura 3-21 Resultado de la tensión en el nudo 4 en la red de 4 nudos sin batería y con batería

En la figura 3-22 sí se aprecia cómo la tensión en el último periodo sí aumenta con respecto a la situación sin batería de acuerdo a la disminución de intensidad que ha sufrido la rama que abastece dicha carga.

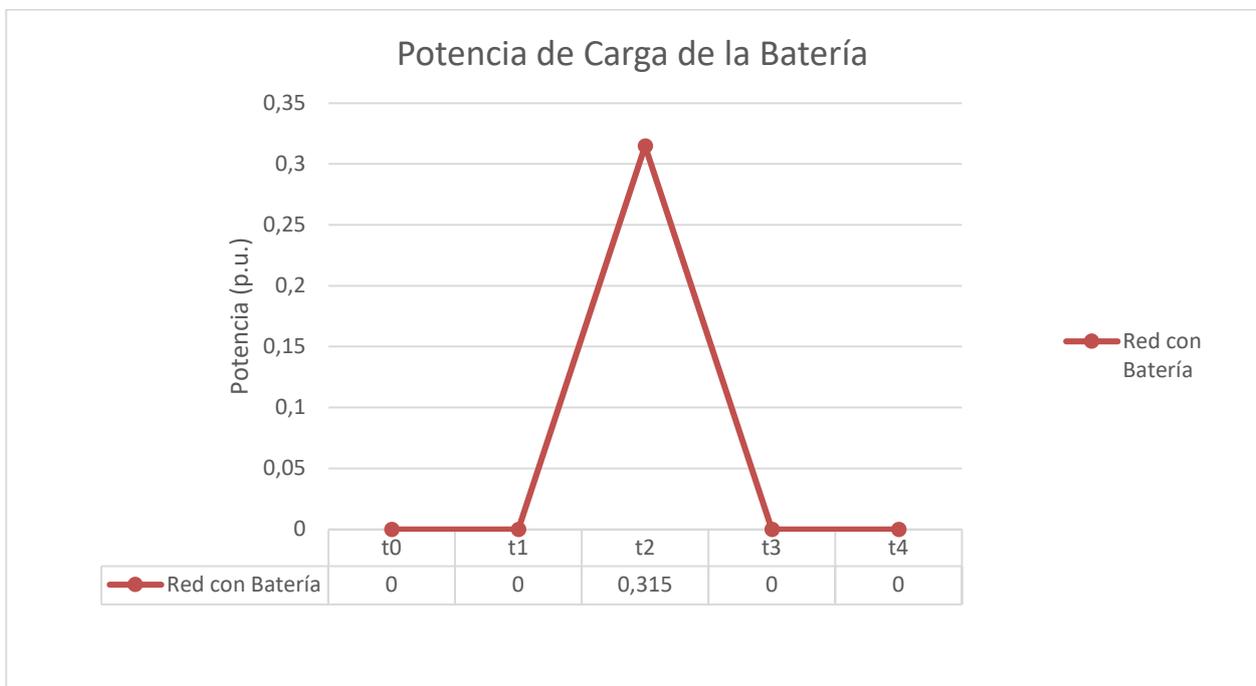


Figura 3-22 Resultado de la potencia de carga de la batería en la red de 4 nudos con batería

Gracias a la figura 3-23 podemos descartar la primera hipótesis propuesta ya que en el periodo t2 la batería se encuentra cargando. Este es el periodo en el que tiene mayor sentido que se produzca la carga de la batería ya que es cuando las cargas demandan menos energía y por tanto el cargar la batería no implica una sobrecarga llamativa en la red.

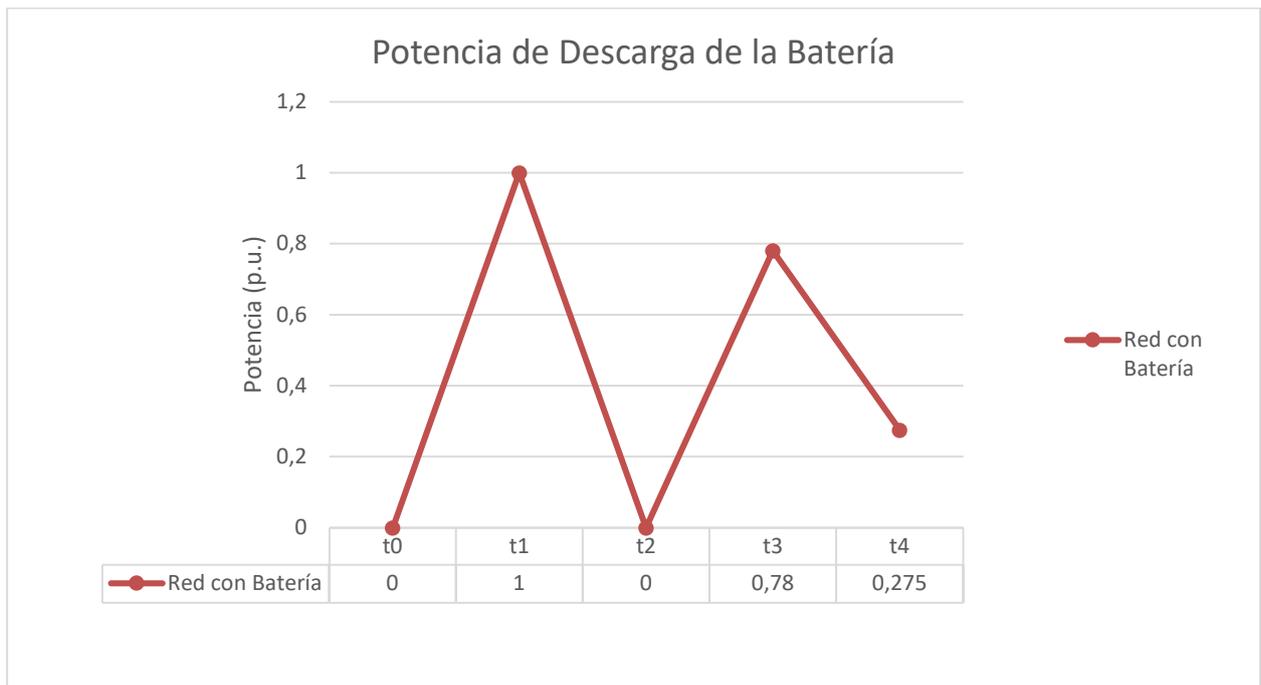


Figura 3-23 Resultado de la potencia de descarga de la batería en la red de 4 nudos con batería

En la figura 3-24 se aprecia como se descarga la batería en el resto de periodos de tiempo desarrollando su mayor descarga en el periodo t1 ya que es cuando las cargas adquieren su máximo nivel.

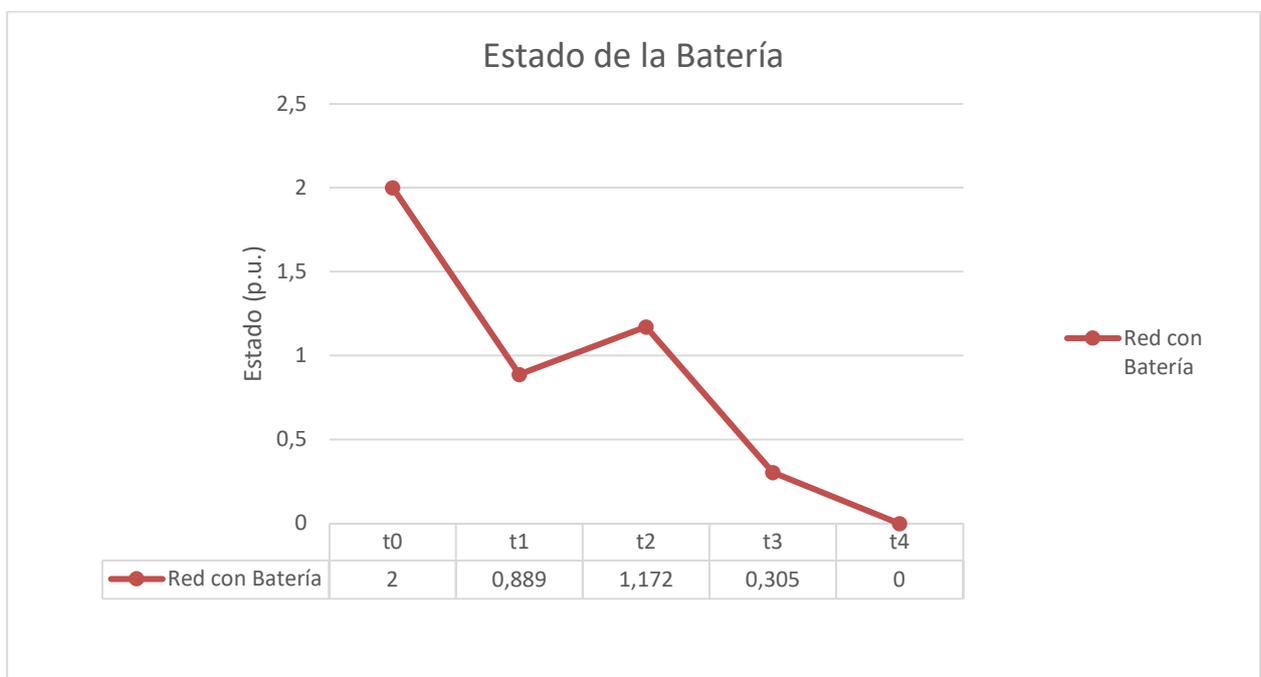


Figura 3-24 Resultado del estado de la batería en la red de 4 nudos con batería

Durante la evolución del estado de la batería, reflejado en la figura 3-25, se observa que lo que prima en el proceso de la batería es la descarga, hecho razonable al tratarse de una red de consumidores.

3.3 Conexión de una batería en el nudo 3 de la red de 4 nudos a través de una línea de continua

Una vez estudiado el caso del conexión de la batería directamente a la red, se procede a estudiar la situación en la que la batería se conecta a través de una línea de continua.

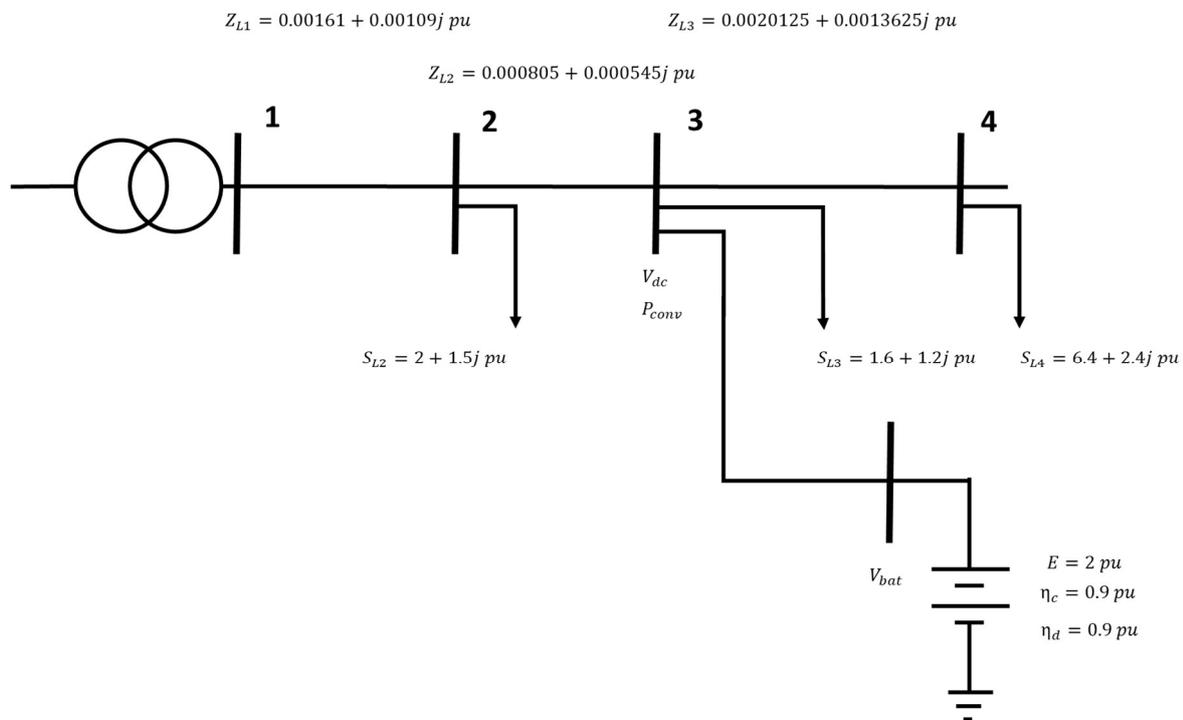


Figura 3-25 Red de 4 nudos con línea de continua y batería

Tal y como se puede ver en la figura 3-27 esta vez se conecta al nudo 3, además de la carga, una línea de continua que a su vez se conecta con la batería.

En la figura se pueden apreciar algunas de las variables que definen dicha línea.

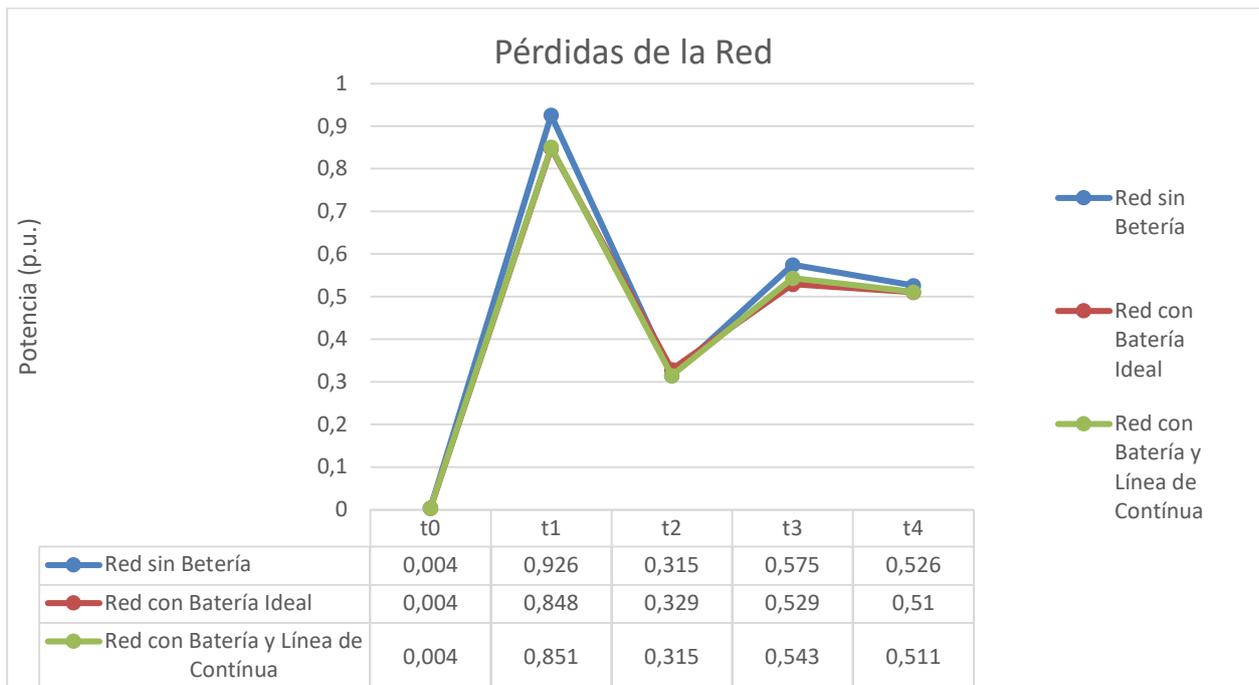


Figura 3-26 Resultado del sumatorio de pérdidas por ramas en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

La función objetivo al añadir la línea de continua pasa a tomar el valor de 2,223 p.u. dicho valor es mayor que el adquirido al incluir la batería directamente, aunque este hecho no es sorprendente ya que es de considerar que la línea de continua aporta pérdidas a diferencia del conexionado directo de la batería.

Respecto a la evolución de las pérdidas a lo largo de los cuatro periodos de la opción con línea de continua comparada con la red sin línea, se aprecia cómo las pérdidas en t2 bajan mientras que en t1, t3 y t4 suben.

En t2 toman el mismo valor que en la situación sin batería, lo que hace pensar que la batería no está actuando.

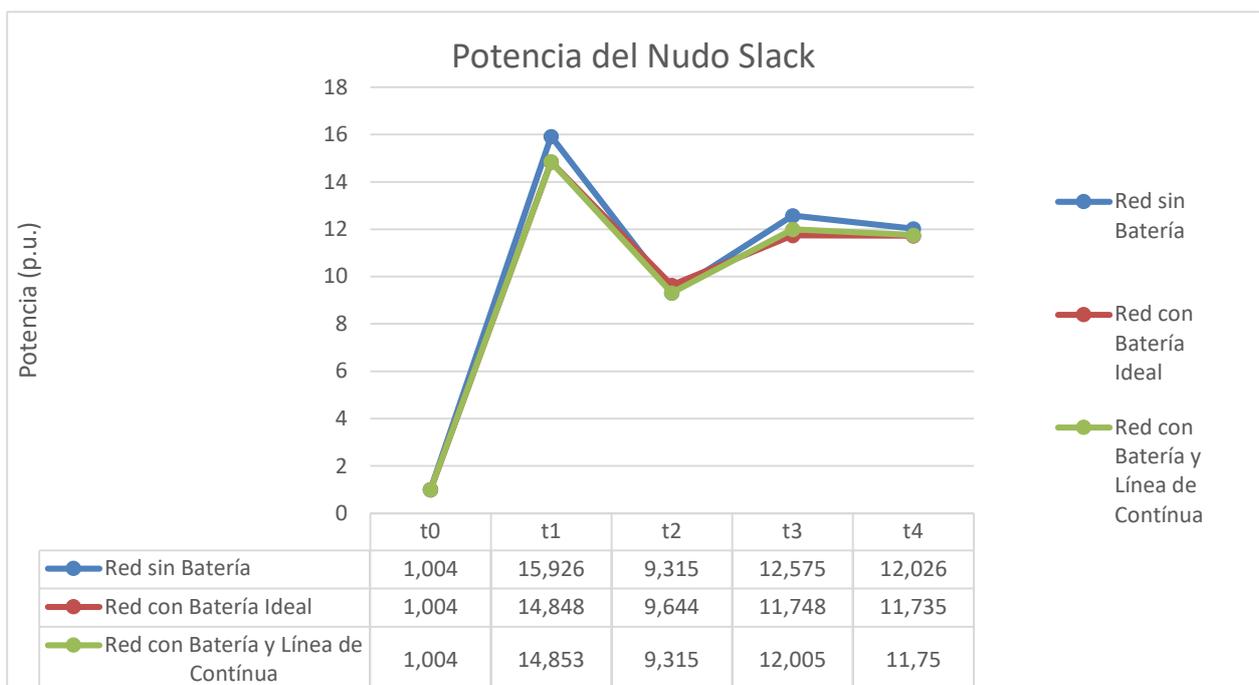


Figura 3-27 Resultado la potencia del nudo Slack en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

Al igual que el resultado de pérdidas, el resultado de potencia del nudo Slack que aparece en la figura 3-29 muestra que los valores aumentan en t2, t3 y t4 mientras que disminuye en t2 respecto a la situación sin línea de continua. Aunque siguen siendo menores que en la opción sin batería, por lo que se demuestra que sería una situación que mejora la eficiencia de la red.

Los resultados son menores respecto la situación sin batería a excepción del periodo t2 que sigue manteniendo el mismo valor en los dos escenarios.



Figura 3-28 Resultado la intensidad por la línea 1-2 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

La intensidad por la línea que conecta el nudo Slack con la red a estudiar, representada la misma evolución que la potencia del nudo Slack como cabe esperar.

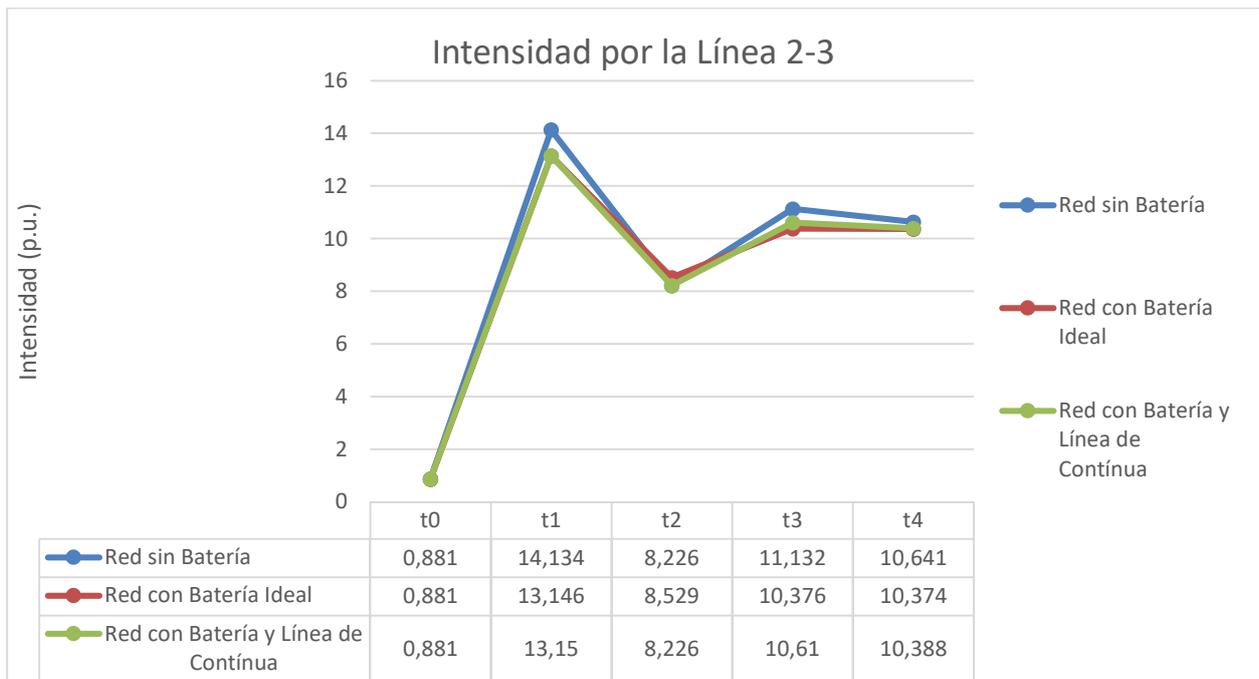


Figura 3-29 Resultado la intensidad por la línea 2-3 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 3-21 no se observa ningún punto inestable ya que sigue la misma evolución que se espera.



Figura 3-30 Resultado la intensidad por la línea 3-4 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 3-32 cabe destacar que la intensidad que circula por la línea 3-4 representa los mismos valores de intensidad en t1 y t4 que en la situación sin línea de continua. Este hecho es destacable ya que estos periodos no cuentan con los mismos valores de potencia del nudo Slack. Esto puede deberse a que la batería descargue una mayor energía o a que la subida de potencia del nudo Slack compense las pérdidas producidas en la línea de

continua y se mantengan los mismos valores de descarga que en la situación sin línea de continua. Estas suposiciones de corroborarán o descartarán al observar los resultados del estado de carga.



Figura 3-31 Resultado la tensión en el nudo 1 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 3-33 mantiene en valor de tensión a 1 p.u. ya que se trata del nudo Slack.

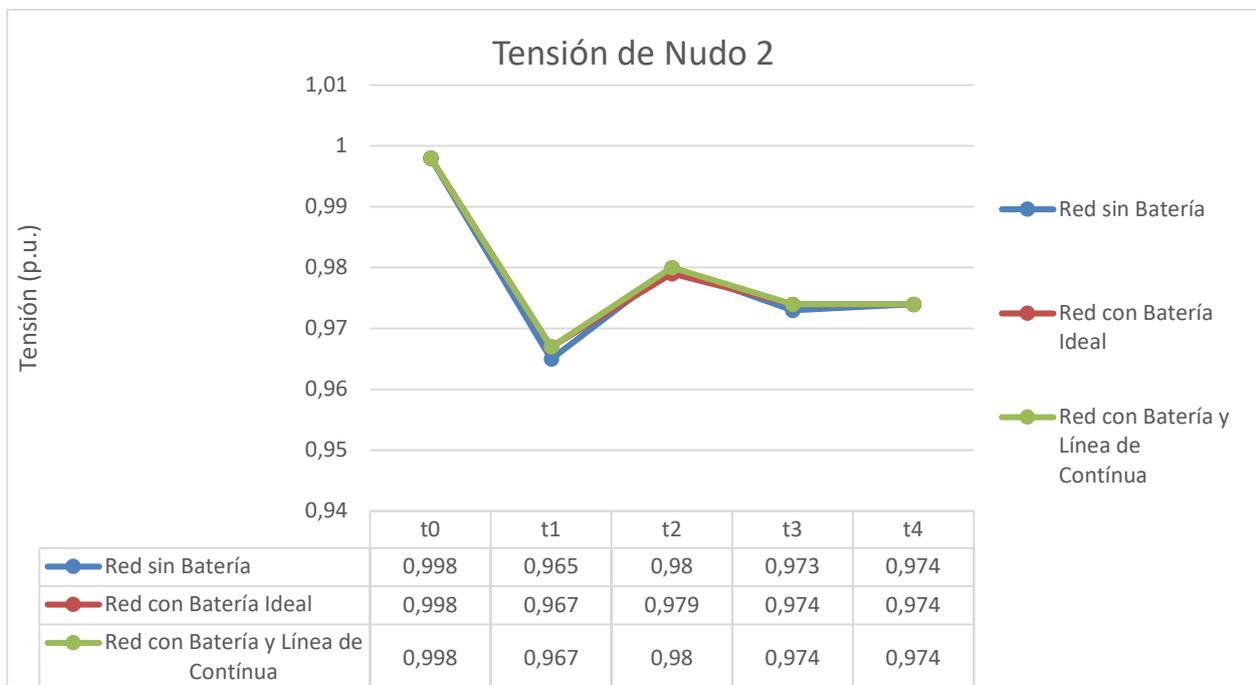


Figura 3-32 Resultado la tensión en el nudo 2 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 3-34 se observa cómo los valores de tensión del nudo 2 se mantienen respecto a la situación sin línea de continua, este hecho puede ser explicado por las mismas hipótesis reflejadas en el análisis de la figura

3-33.

El hecho de mantener el mismo valor de tensión en el periodo t2 respecto a la situación sin batería reafirma el pensamiento del no funcionamiento de la batería en dicho periodo.

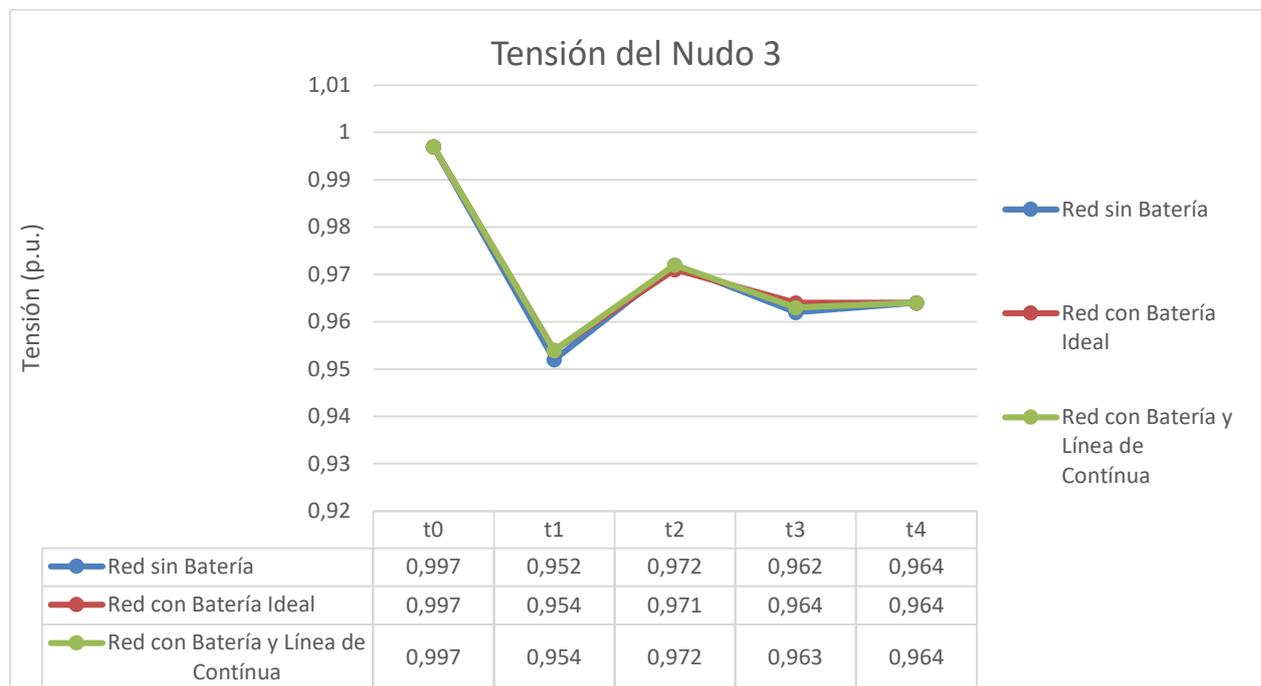


Figura 3-33 Resultado la tensión en el nudo 3 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

La figura 3-35 representa que los valores de tensión de los periodos t1 y t4 se mantienen a diferencia del periodo t3, aunque es un valor muy similar. Esto implica que el programa de optimización está buscando que la red funcione de la misma manera que cuando no contaba con línea de continua con la diferencia de intentar solventar las pérdidas de dicha línea.

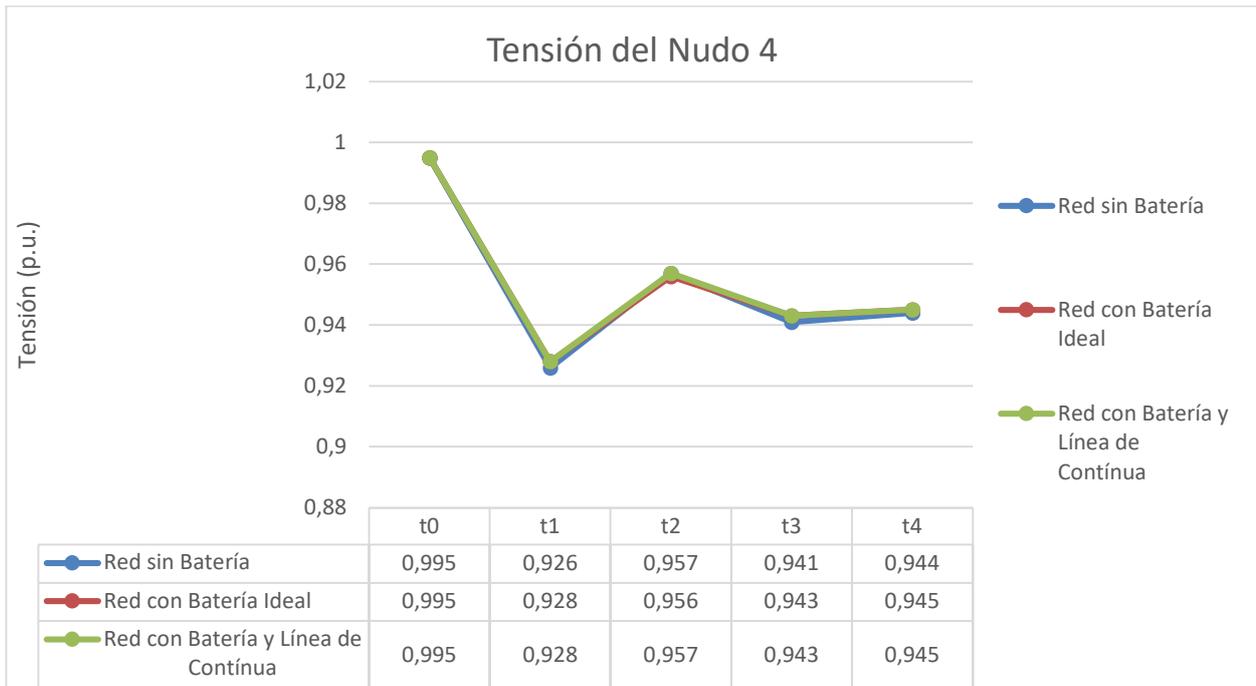


Figura 3-34 Resultado la tensión en el nudo 4 en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

Finalmente, en la figura 3-36 se aprecia cómo la tensión que llega al nudo final, nudo 4, coincide con la tensión de dicho nudo en la situación sin línea de continua a excepción del periodo t2, periodo en el que no se encuentra la batería en funcionamiento. Este hecho puede ser debido a que los valores de tensión obtenidos como resultado para la situación sin línea de continua sean los mínimos posibles para satisfacer las cargas conectadas a dichos nudos.

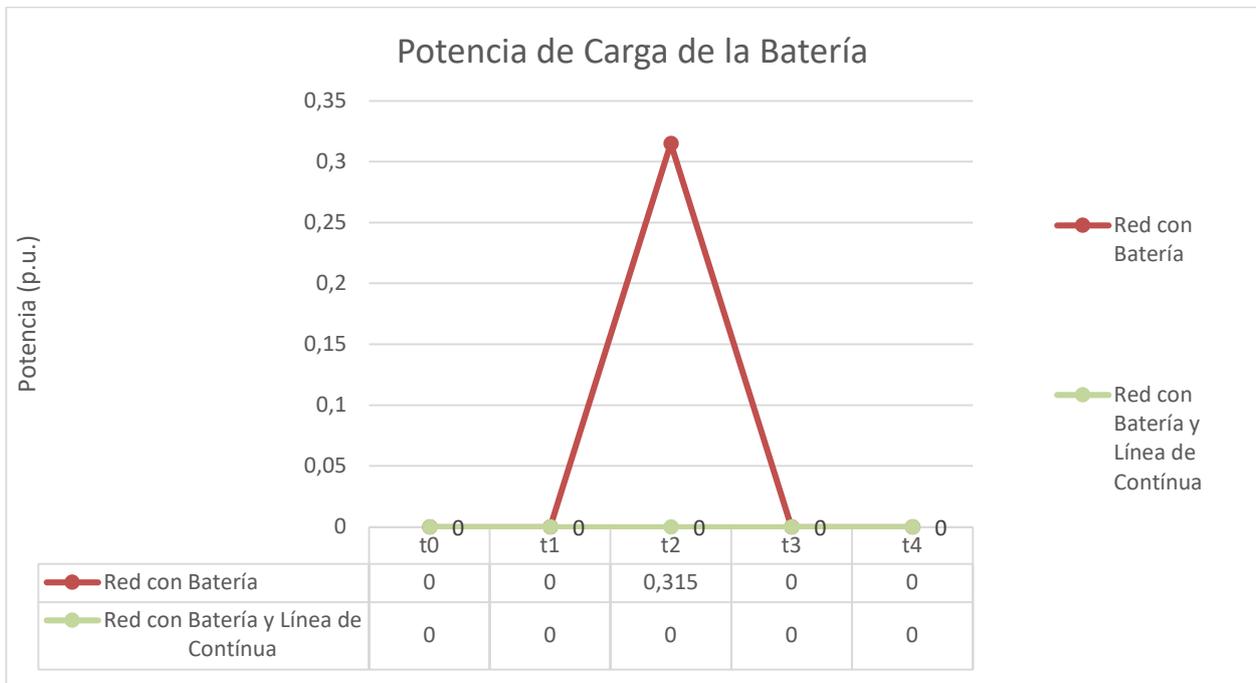


Figura 3-35 Resultado la potencia de carga de la batería en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 3-37 se aprecia cómo la batería no se carga en ningún instante de tiempo, esto puede ser debido a que las pérdidas durante el transporte de energía desde el nudo Slack hasta el último nudo de la red sean más reducidas hasta ciertos niveles de transporte que las pérdidas provocadas por la línea de continua.

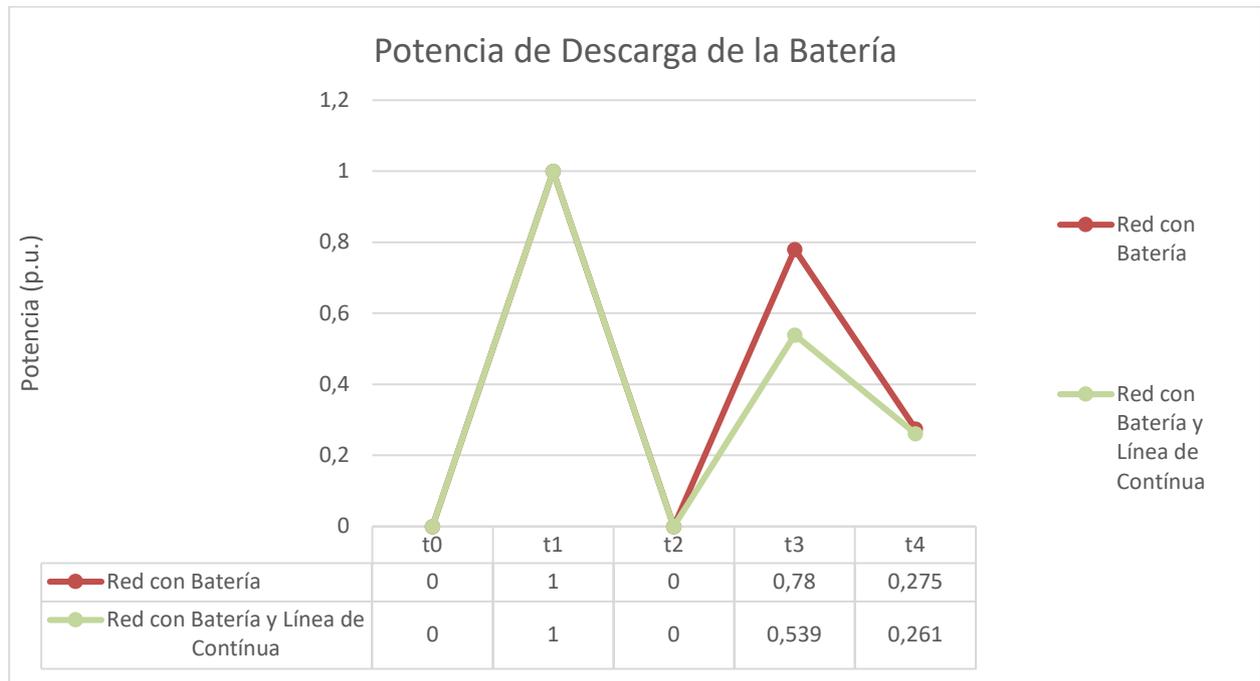


Figura 3-36 Resultado la potencia de descarga de la batería en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

Tal y como era de esperar, al ser una red de consumidores, la batería se descarga, eso sí, en menor medida que en el escenario con la batería conectada sin línea de continua. La reducción de descarga de la batería junto con el aumento de potencia del nudo Slack hace que las intensidades y tensiones de la red sean prácticamente iguales en los periodos t3 y t4.

Respecto al periodo t1 la figura 3-38 muestra cómo en los dos últimos escenarios la potencia de descarga de la red coincide este hecho es destacable ya que la intensidad por la línea 3-4 y las tensiones de los nudos 2, 3 y 4 en este periodo de tiempo coincide con la situación sin línea de continua. Este hecho es aceptable ya que el aumento de potencia del nudo Slack en dicho periodo de tiempo puede solventar las pérdidas provocadas por la línea de continua, llegando a abastecer las cargas conectas a los últimos nudos con los mismos valores de tensión e intensidad.

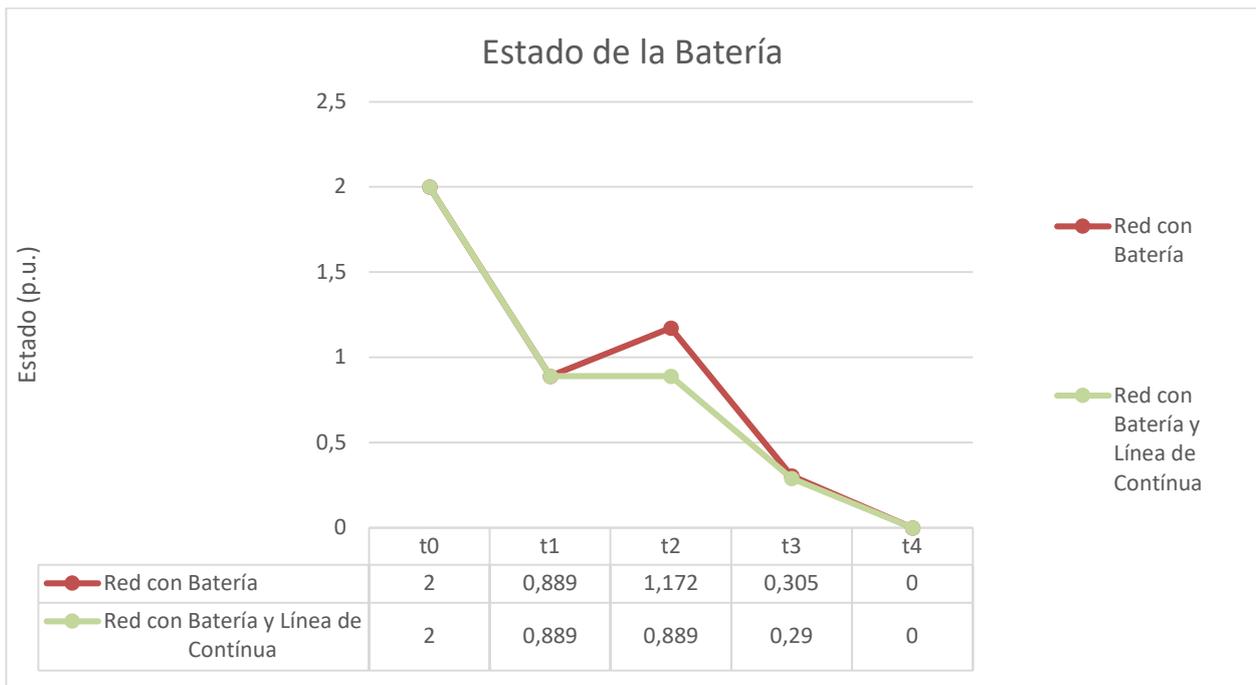


Figura 3-37 Resultado del estado de la batería en la red de 4 nudos sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 3-39 se observa lo antes mencionado, es decir, cómo la batería descarga en todo momento excepto en t2 y con una curva menos pronunciada que la representada en el escenario de batería sin línea de continua.

4 RESULTADOS EN LA RED A ESCALA DE BAJA TENSIÓN DE LOS LABORATORIOS DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

4.1 Resultados del flujo de carga de la red a escala de baja tensión

Tras comprender el análisis en una red pequeña se pasa a elaborar el análisis de interés, el de la red híbrida de escala de baja tensión del laboratorio. Dicha red consiste en una serie de cargas conectadas en los nudos 11 y 12 y una serie de generaciones fotovoltaicas conectas en los nudos 10, 9 y 8. De esta manera se crea el escenario de Red Distribuida, las generaciones fotovoltaicas constituyen las generaciones cercas del punto de consumo.

Dicha red es la siguiente:

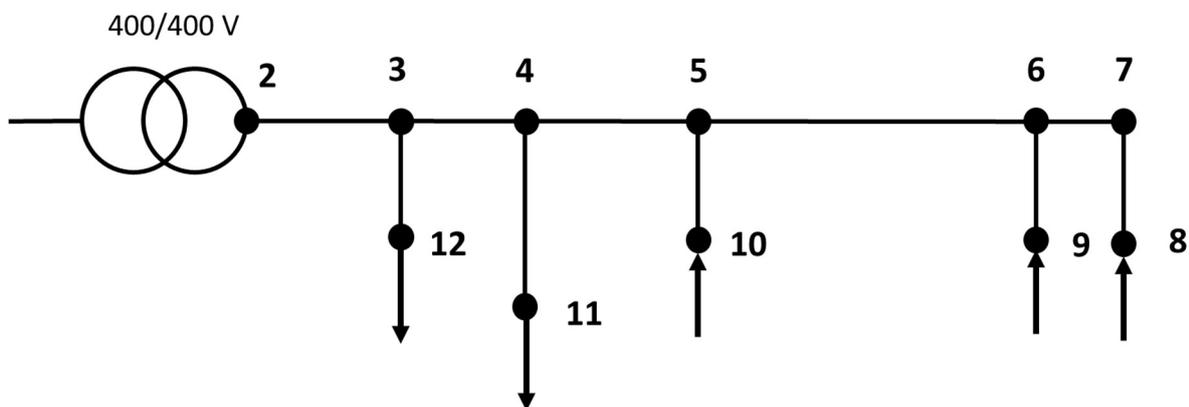


Figura 4-1 Red a escala de baja tensión de los laboratorios

$$Z_{L2-3} = 0.0933 + 0.0600 j \Omega$$

$$Z_{L3-4} = 0.0454 + 0.0292 j \Omega$$

$$Z_{L4-5} = 0.0922 + 0.0526 j \Omega$$

$$Z_{L5-6} = 0.1505 + 0.0967 j \Omega$$

$$Z_{L6-7} = 0.0437 + 0.0281 j \Omega$$

$$Z_{L7-8} = 0.1692 + 0.0229 j \Omega$$

$$Z_{L6-9} = 0.1757 + 0.0238 j \Omega$$

$$Z_{L5-10} = 0.1767 + 0.0240 j \Omega$$

$$Z_{L4-11} = 0.5343 + 0.0724 j \Omega$$

$$Z_{L3-12} = 0.1977 + 0.0268 j \Omega$$

Al igual que en el estudio anterior, se trabajará en por unidad. Para ello se ha considerado que el valor de tensión base es 400 V y el de potencia 100 kW.

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(400)^2}{100 * 10^3} = 1.6 \Omega$$

Dividiendo los datos de partida entre los parámetros base se obtienen los valores de la red en pu.

$$Z_{L2-3} = 0.0583 + 0.0375 j pu$$

$$Z_{L3-4} = 0.0284 + 0.0183 j pu$$

$$Z_{L4-5} = 0.0576 + 0.0329 j pu$$

$$Z_{L5-6} = 0.0941 + 0.0504 j pu$$

$$Z_{L6-7} = 0.0273 + 0.0176 j pu$$

$$Z_{L7-8} = 0.1058 + 0.0143 j pu$$

$$Z_{L6-9} = 0.1098 + 0.0149 j pu$$

$$Z_{L5-1} = 0.1104 + 0.015 j pu$$

$$Z_{L4-11} = 0.3339 + 0.0453 j pu$$

$$Z_{L3-12} = 0.1236 + 0.0168 j pu$$

Una vez conseguidos los valores en por unidad se procede a montar las matrices G y B.

$$G = \begin{bmatrix} 12.1328 & -12.1328 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -12.1328 & 44.9573 & -24.8806 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -24.8806 & 40.9118 & -13.0904 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.9439 & 0 \\ 0 & 0 & -13.0904 & 29.5104 & -7.5262 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.9408 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -7.5262 & 42.3446 & -25.8756 & 0 & 0 & -8.8938 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -25.8756 & 35.1578 & -9.2822 & -8.9428 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -9.2822 & 9.2822 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -8.9428 & 0 & 0 & 0 & 8.9428 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -8.8938 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8.8938 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2.9408 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.9408 & 0 \\ 0 & -7.9439 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.9439 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -7.8041 & 7.8041 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7.8041 & -24.9161 & 16.0322 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16.0322 & -23.9082 & 7.477 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0797 & 0 \\ 0 & 0 & 7.477 & -13.5162 & 4.8309 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.399 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.8309 & -22.7261 & 16.6817 & 0 & 0 & 1.2084 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16.6817 & -17.9363 & 1.2546 & 1.2135 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.2546 & -1.2546 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.2135 & 0 & 0 & -1.2135 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.2084 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.2084 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.399 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.399 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0797 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0797 & 0 \end{bmatrix}$$

Los parámetros, conjuntos y variables definidos para el análisis de la red híbrida son los mismos que para el análisis de la red de 4 nudos. La única diferencia serían los nuevos valores de potencia generada, consumida e impedancias.

Para acercar el estudio a la situación de generación distribuida se incluye a la red estudiada en el apartado anterior un perfil de potencias para cada nudo durante 24 horas.

Con este perfil se simula la conexión de cargas reales, es decir, cargas que no siempre se comportan de la misma manera. Y a su vez también se considera que las generaciones son paneles fotovoltaicos y, por tanto, tampoco generan siempre la misma energía. De noche por ejemplo no generan y a lo largo del día alcanzan su máximo punto de producción.

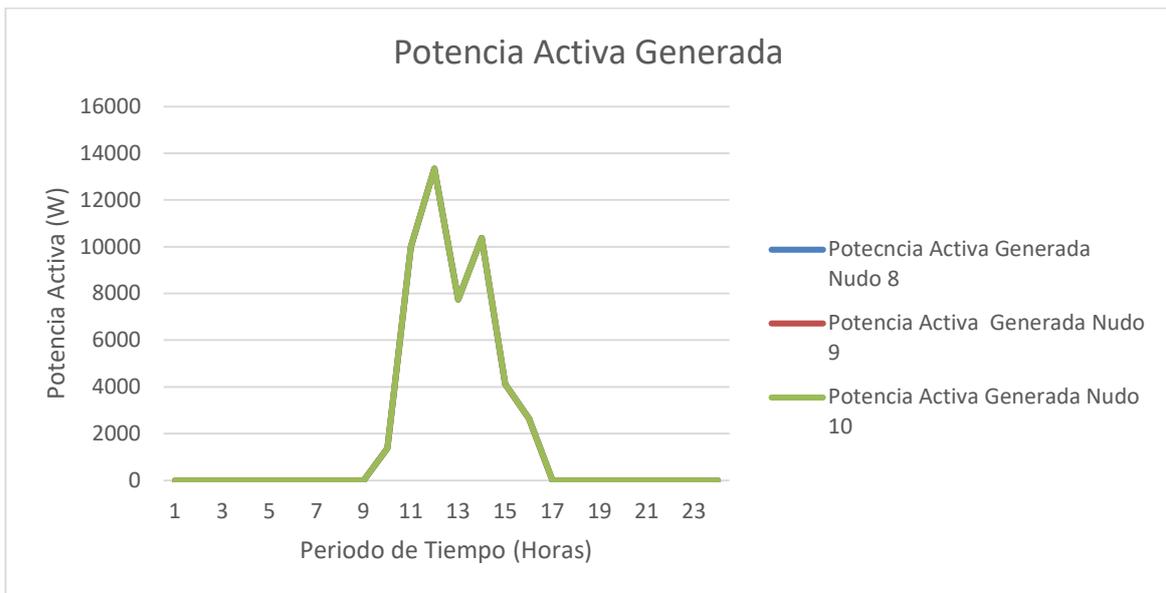


Figura 4-2 Datos de potencia activa generada en la red a escala de baja tensión del laboratorio con perfiles de potencia

En la figura 4-2 se observa cómo evoluciona la generación de la red a lo largo del tiempo. La generación de los 3 nudos coincide, alcanzando su punto de máxima generación a las doce del medio día generando únicamente en las horas de radiación solar. Estas serían entre las nueve de la mañana y las cinco de la tarde.

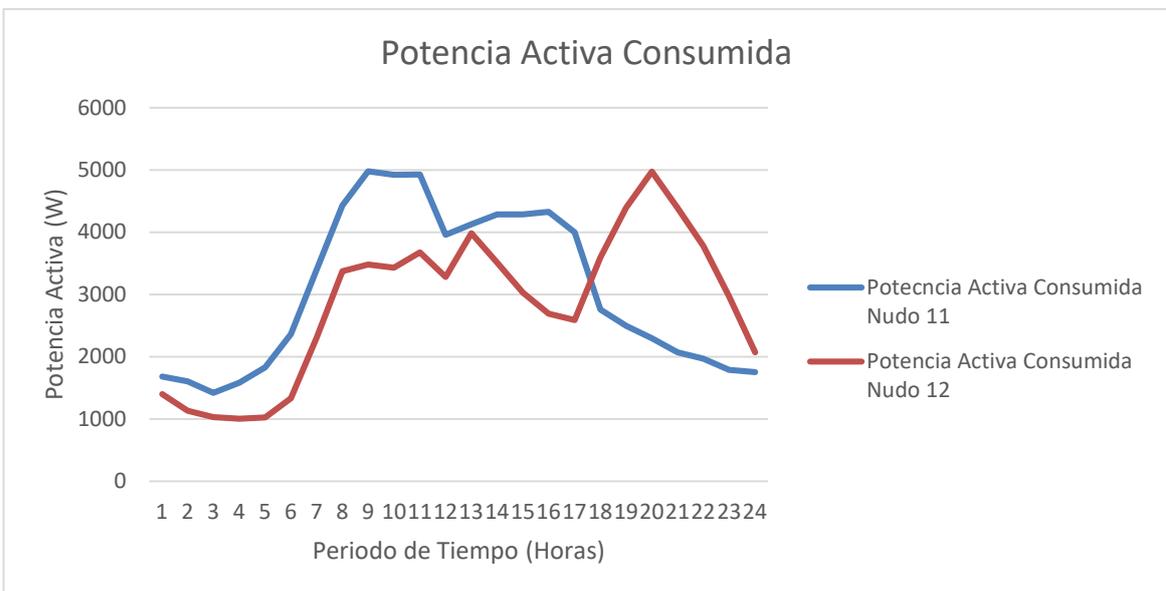


Figura 4-3 Datos de potencia activa consumida en la red a escala de baja tensión del laboratorio con perfiles de potencia

De la misma manera que se consume en la red potencia activa, también se consume potencia reactiva. Ese consumo queda reflejado en la siguiente figura.

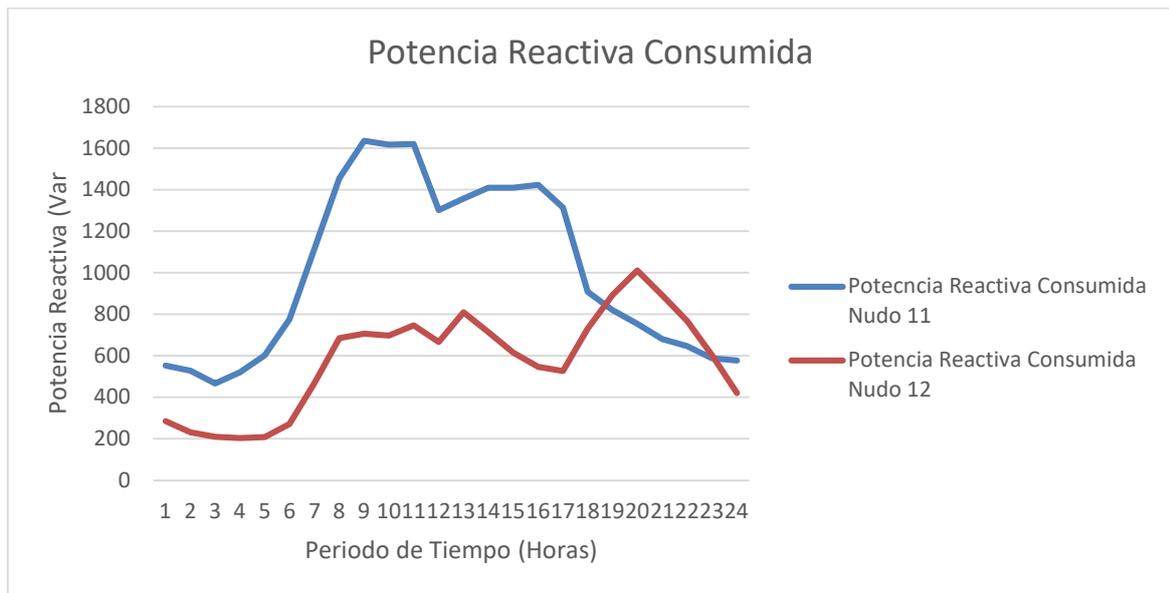


Figura 4-4 Datos de potencia reactiva consumida en la red a escala de baja tensión del laboratorio con perfiles de potencia

En cuanto al consumo eléctrico, se observa en la figura 4-3 cómo los puntos más bajos de consumo se producen durante la madrugada y van subiendo a lo largo de la mañana.

El nudo 11 alcanza su pico de consumo durante la mañana, relaja su curva a medio día y vuelve a subir por la tarde decayendo a partir de las cuatro de la tarde. Por tanto, este consumo se puede tomar como un consumo típico del ámbito laboral.

El nudo 12 comienza a aumentar su consumo a lo largo de la mañana, aunque de manera más relajada al del nudo 11. Durante medio día sufre un pico, aunque el pico más destacado aparece sobre las nueve de la noche, hora que coincide con el horario de cena española. Por este motivo este consumo puede ser un buen reflejo del consumo de un hogar español.

De esta manera, se puede observar cómo esta situación se puede acercar a una situación algo más real que las estudiadas anteriormente y, por tanto, la situación anterior ha sido un simple medio de validación para llegar al estudio deseado.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado se obtienen los siguientes resultados.

Pérdidas de la Red

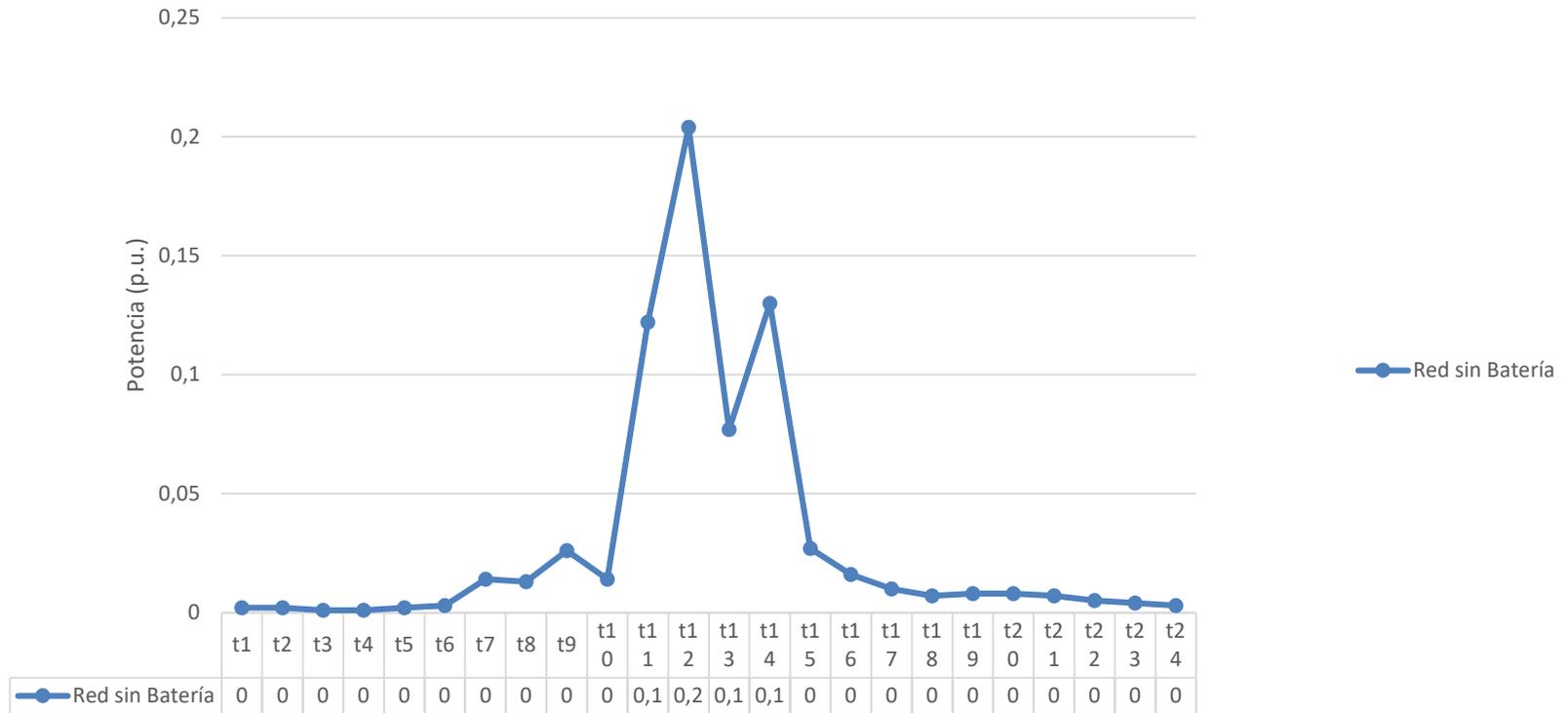


Figura 4-5 Resultado del sumatorio de pérdidas en la red de escala de baja tensión sin batería

En el caso en el que no hay batería la función objetivo, es decir, el sumatorio de pérdidas toma como valor 0,707 p.u.

En la figura 4-5 se aprecia cómo evolucionan dichas pérdidas a lo largo del tiempo. Los puntos de mayores pérdidas de la red se encuentran durante las horas de generación fotovoltaica, esto puede ser debido a que es el momento donde la red se encuentra con mayor carga y por tanto, esté produciendo más de lo que necesitan las cargas que tiene que abastecer.

Potencia del Nudo Slack

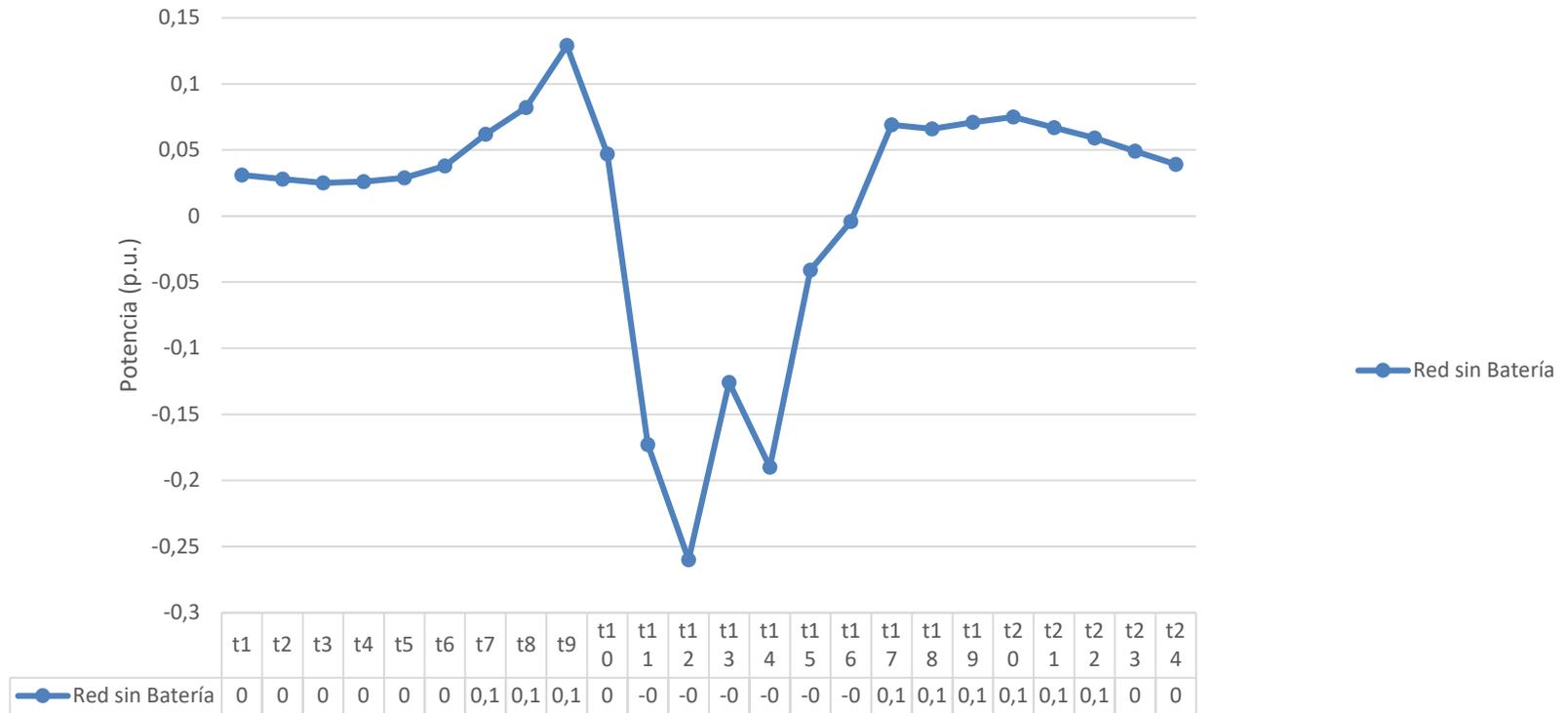


Figura 4-6 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de escala de baja tensión sin batería

Con la gráfica 4-6 se corrobora que durante las horas de generación fotovoltaica se está produciendo más energía de la que demandan las cargas y por tanto, el nudo Slack actúa cediendo potencia.

En el resto de periodos de tiempo, el nudo Slack actúa absorbiendo potencia. A medida que se adentra la madrugada la absorción es menor aunque la generación fotovoltaica es nula, esto es debido a que son las horas nocturnas y por tanto, la mayoría de la población está durmiendo y no consumiendo. A medida que va amaneciendo la absorción se hace más presente observándose un pico a las 9 de la mañana. A dicha hora la irradiancia no llega a ser tan intensa como para abastecer el nivel de energía que se demanda en el ámbito

tanto laboral como en el hogar. A las 9 de la mañana la mayoría de la población se ha despertado y ya se encuentra trabajando, en el colegio, preparándose en casa para ir a trabajar, etc. Desde esta hora la irradiancia comienza a aumentar, sobrepasando el nivel de energía consumida, aunque la demanda energética en este tramo horario sigue siendo considerable.

Posteriormente, desde las cinco de la tarde, se comienza a absorber otra vez energía obteniendo hasta las diez de la noche valores altos de absorción, esto entra dentro de la normalidad española ya que el español no suele irse a la cama antes de las diez de la noche.



Figura 4-7 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería

La figura 4-8 representa la intensidad que circula por el punto de conexión con la red externa. Ella corrobora los resultados observados en la figura 4-7 en cuanto al nivel de uso del nudo Slack. Se aprecia que es durante las horas de mayor irradiancia cuando circula mayor intensidad por esta línea y por tanto es cuando se cede mayor potencia por el nudo Slack. También se aprecia cómo en las horas nocturnas es cuando menos intensidad circula por ella ya que existe menor demanda en la red.

Lo que no refleja la figura 4-7 es el sentido de la intensidad y por tanto no se aprecia si la energía se está absorbiendo o cediendo a diferencia de la figura 4-7. Esto es debido a que el cálculo de la intensidad se ha hecho como la raíz cuadrada de la intensidad al cuadrado, perdiendo así toda información sobre el signo.



Figura 4-8 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería

En esta situación en el nudo 10 hay conectado únicamente una generación fotovoltaica por lo que la intensidad por la línea 5-10 que se observa en la figura 4-9 coincide con la evolución de la energía generada por dicha generación fotovoltaica sin observar ningún resultado a destacar. La evolución de la potencia en el nudo 10 se encuentra en la figura 4-2.



Figura 4-9 Resultado de la intensidad por la línea 5-6 en la red de escala de baja tensión sin batería

Las conexiones directas a la línea 5-6 son generaciones fotovoltaicas, ninguna carga. Por tanto, también es entendible que dicha intensidad, la representada en la figura 4-9, evolucione de la misma manera que dichas generaciones. Dicha intensidad adquiere valores mayores que la representada en la figura 5-10, esto se debe a que por la línea 5-6 se acumula la energía inyectada por los nudos 8 y 9 mientras que por la línea 5-10 la energía que circula es la inyectada en el nudo 10.

Tensión del nudo 3

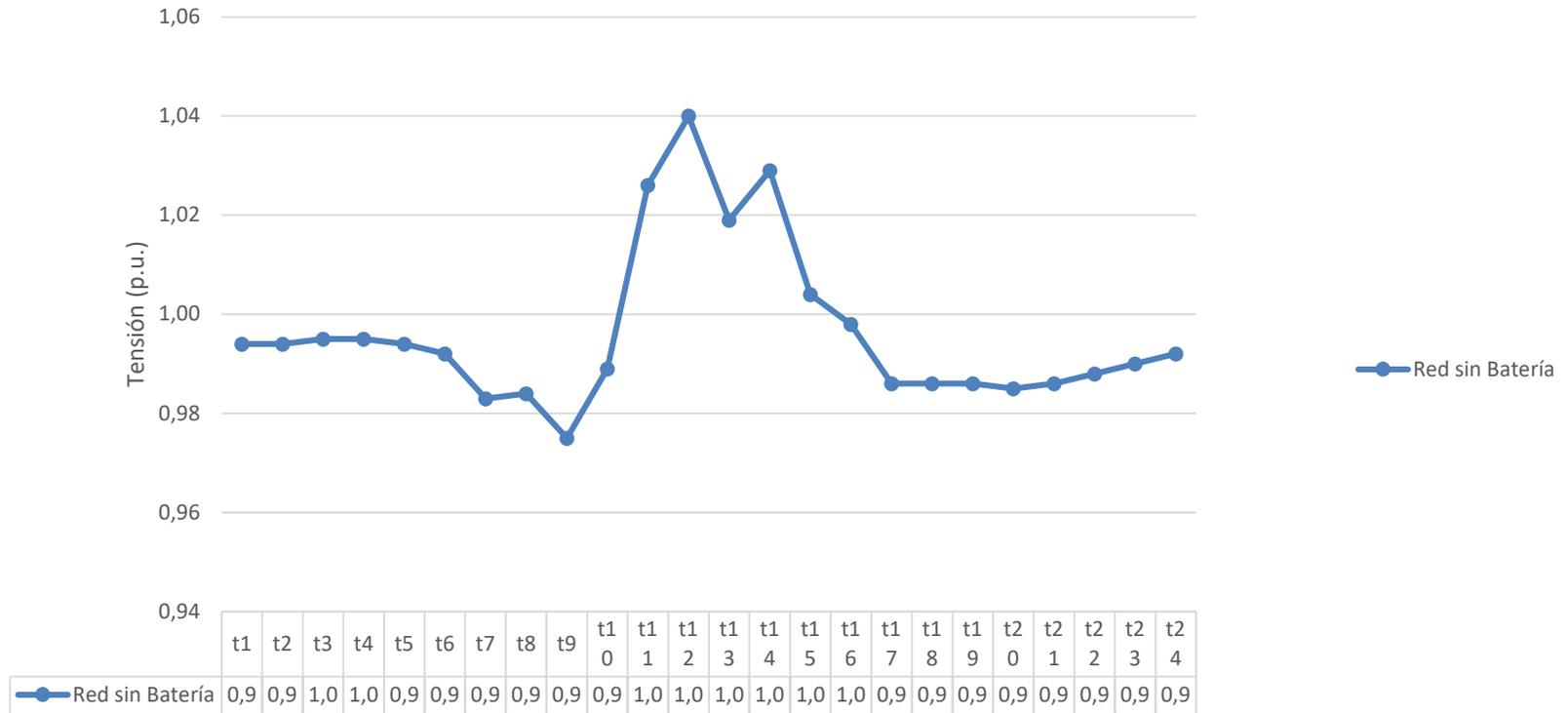


Figura 4-10 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de escala de baja tensión sin batería

La tensión del nudo 3 de la figura 4-10 corrobora el resultado obtenido para el nudo Slack en la figura 4-7. Los valores de mayor tensión son el tramo de mayor uso del nudo Slack. En los tramos en los que el uso del nudo Slack no es destacable, la tensión disminuye con el aumento de la demanda de la carga conectada en el nudo 12 (figura 4-4) y aumenta al disminuir esta. Así es como debe comportarse la tensión de un nudo de consumo en condiciones normales, es decir cuando la energía que llega a él es la necesaria para abastecer su carga.

Tensión del nudo 10

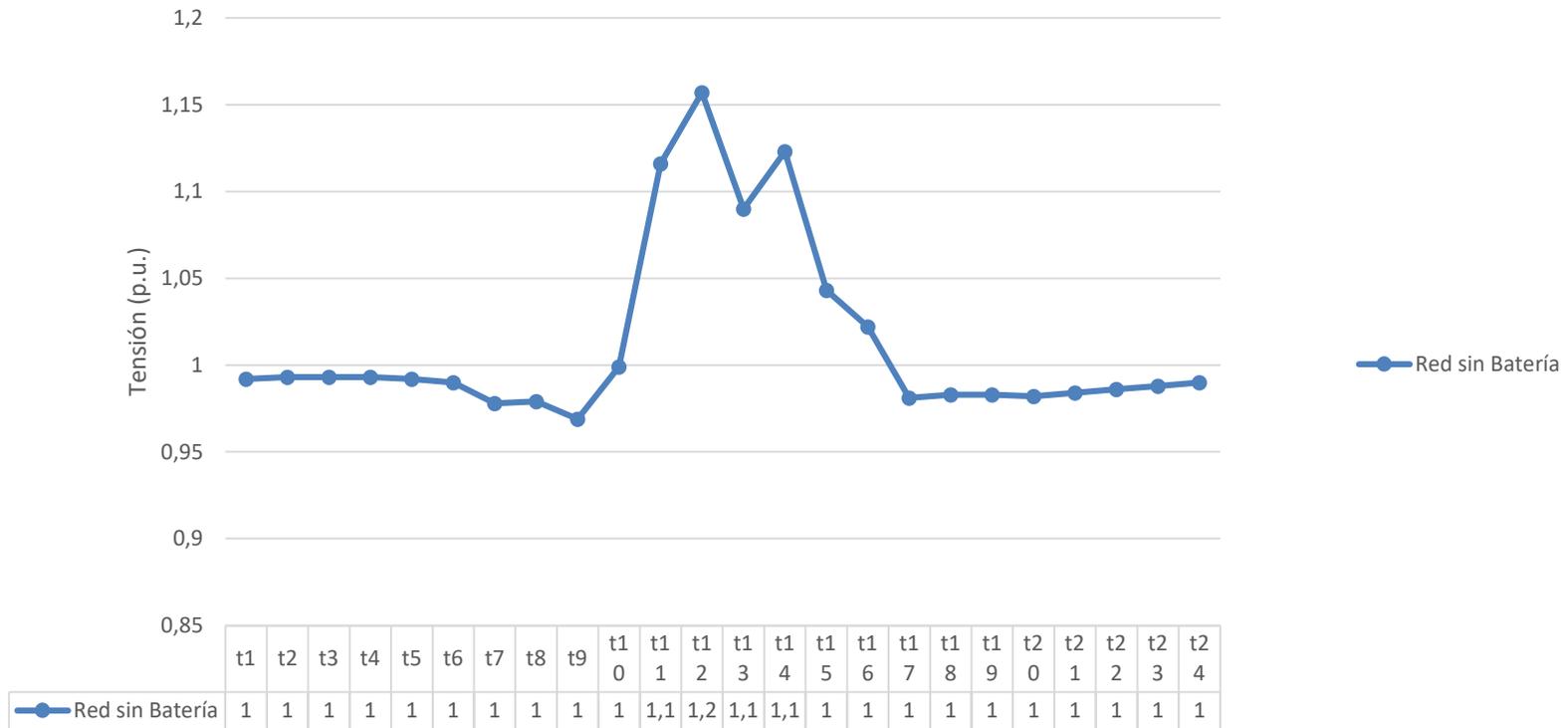


Figura 4-11 Resultado de la tensión en el nudo 10 en la red de escala de baja tensión sin batería

La figura 4-12 presenta una silueta parecida a la de la generación fotovoltaica, con la particularidad de no disponer de tensión nula durante el tramo de no generación. Este hecho es debido a que el nudo 10 se encuentra conectado a la propia red que se abastece del nudo Slack y por tanto de estar a tensión, ya que para que no circule intensidad por la rama 5-10, los valores de tensión de ambos nudos deben coincidir y lo mismo ocurre por tanto con el nudo 4 y para que circule intensidad en la línea 4-5 en el momento de no generación. Los valores de tensión aumentan conforme disminuyen los valores de las cargas tal y como se vio en la figura 4-11.

Tensión del nudo 6

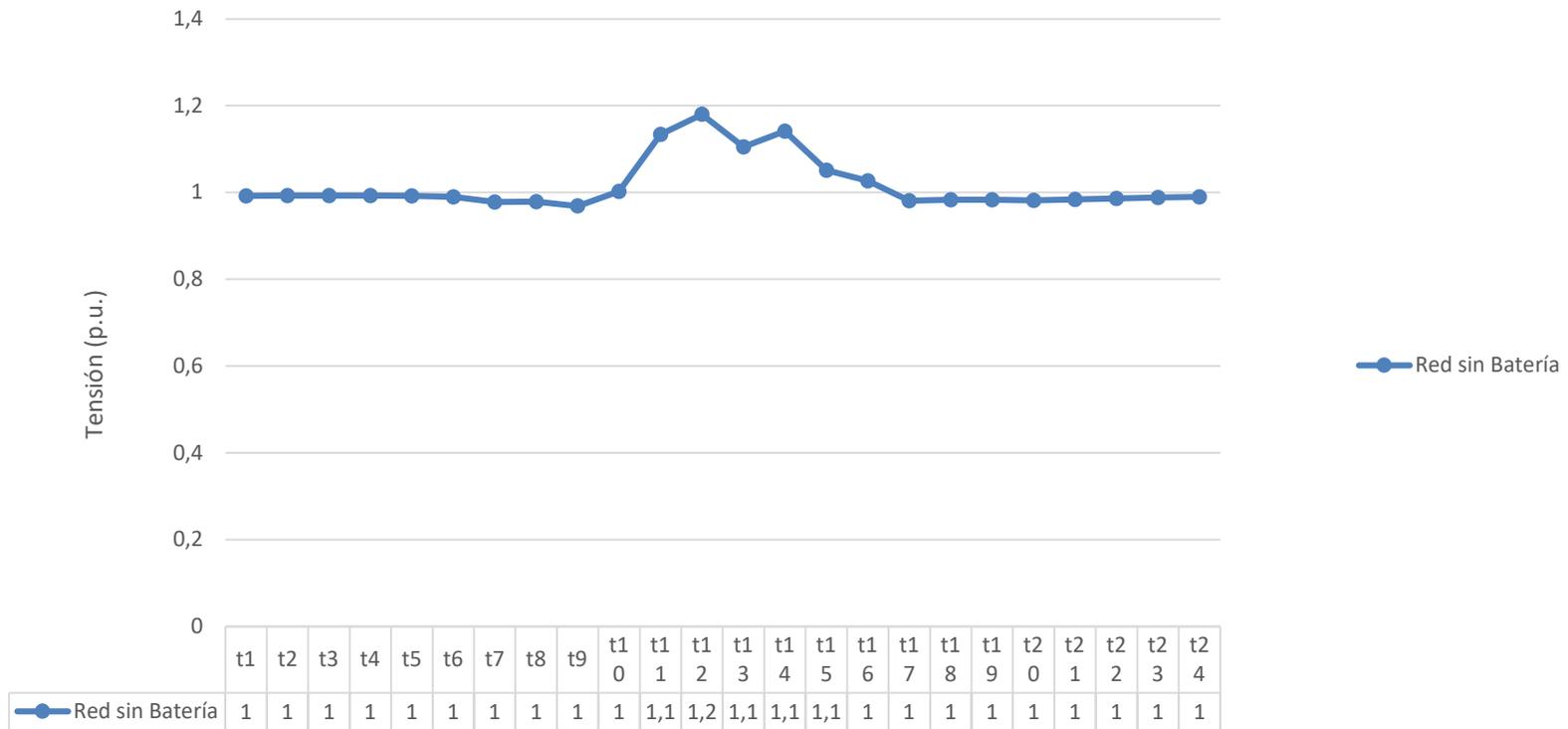


Figura 4-12 Resultado de la tensión en el nudo 6 en la red de escala de baja tensión sin batería

En la figura 4-12 se aprecia como el nudo 6 se comporta de la misma manera que el nudo 10. Durante el tramo de generación la figura 4-13 obtiene valores menores que la 4-12, esto es debido a que en el nudo 10 se encuentra conectada la generación (generación coincidente con la generación conectada al nudo 9). La energía debe ir desde el nudo 9 al 6 para abastecer a las cargas de la red y por tanto, la tensión del nudo 6 debe ser menor para que la intensidad vaya en el sentido indicado.

4.2 Resultados del conexionado de una batería en el nudo 10 de la red a escala de baja tensión directamente

Al igual que en la red simple se ha conectado a la nueva red de estudio, una batería de manera directa sin considerar ninguna interconexión intermedia. El nudo elegido para el conexionado ha sido en este caso es 10 tal y como aparece en la figura 4-13.

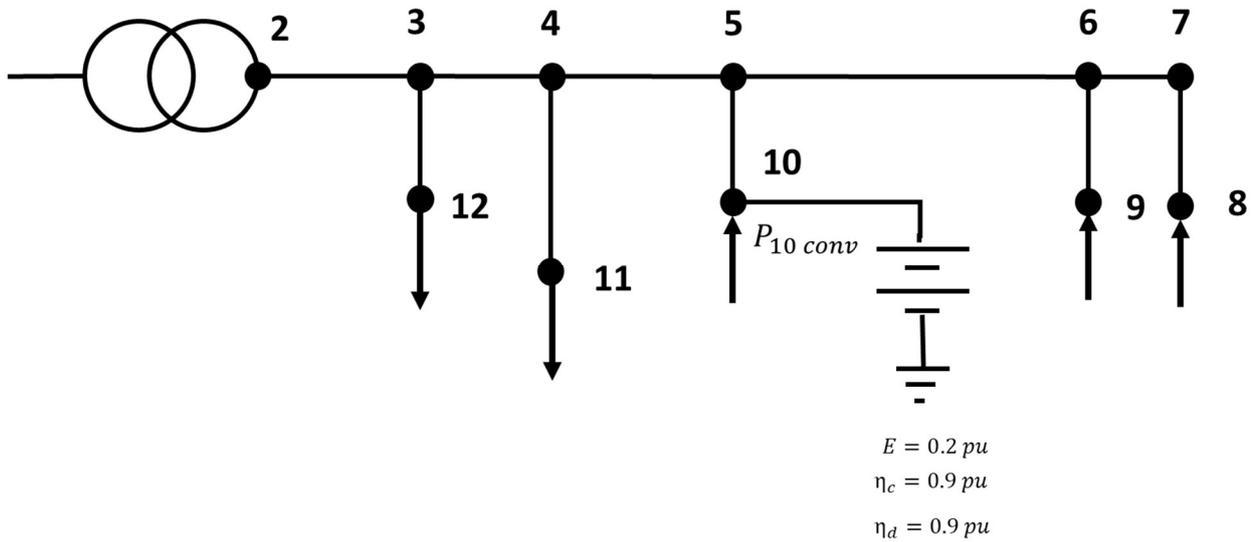


Figura 4-13 Red a escala de baja tensión de los laboratorios con batería

En la figura 4-13 se aprecia cómo el nudo 10 deja de ser un nudo de simple generación para pasar a ser un nudo híbrido. Permiéndosele de esta manera almacenar energía.

También aparecen representados los parámetros característicos de la batería, que son los mismos que los aplicados a la red de 4 nudos durante la validación del modelo.

Pérdidas de la Red

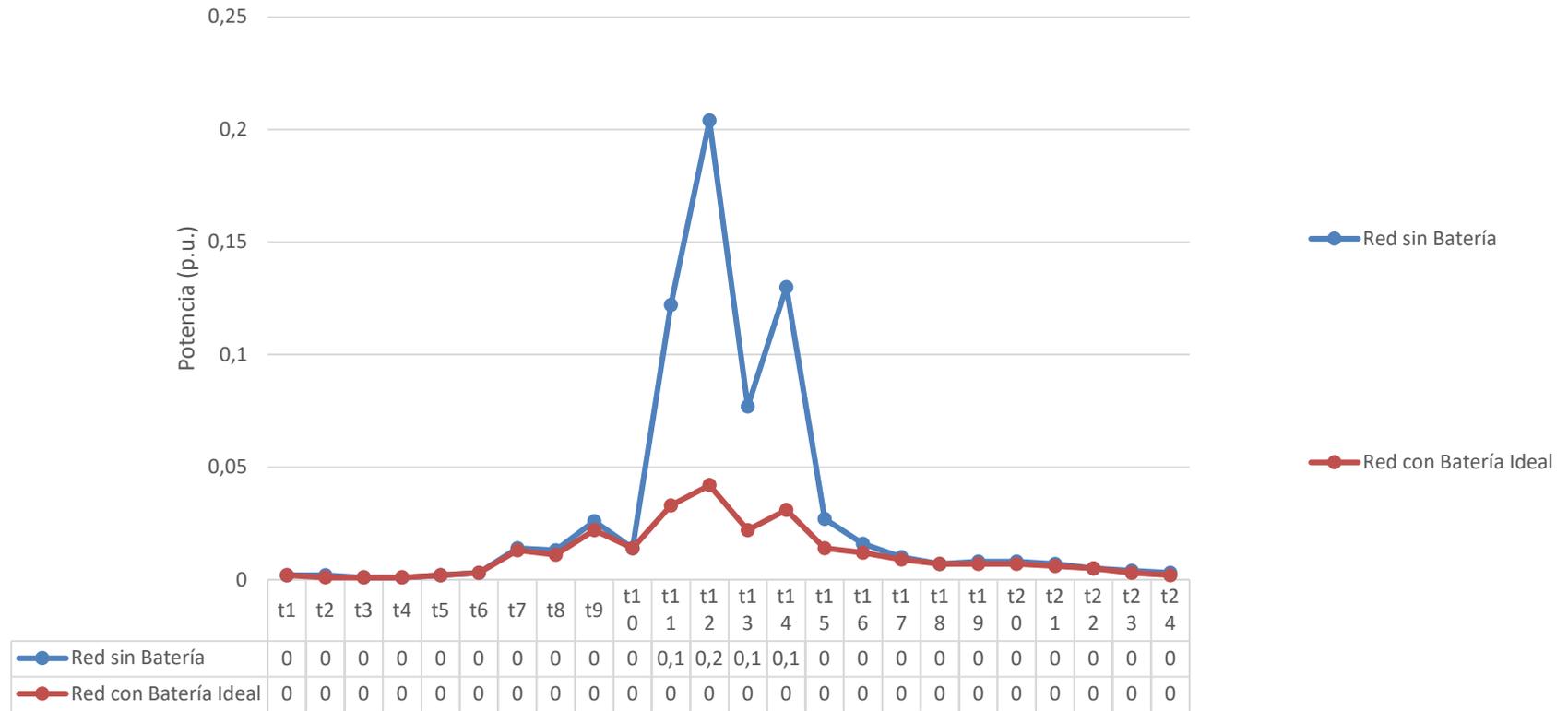
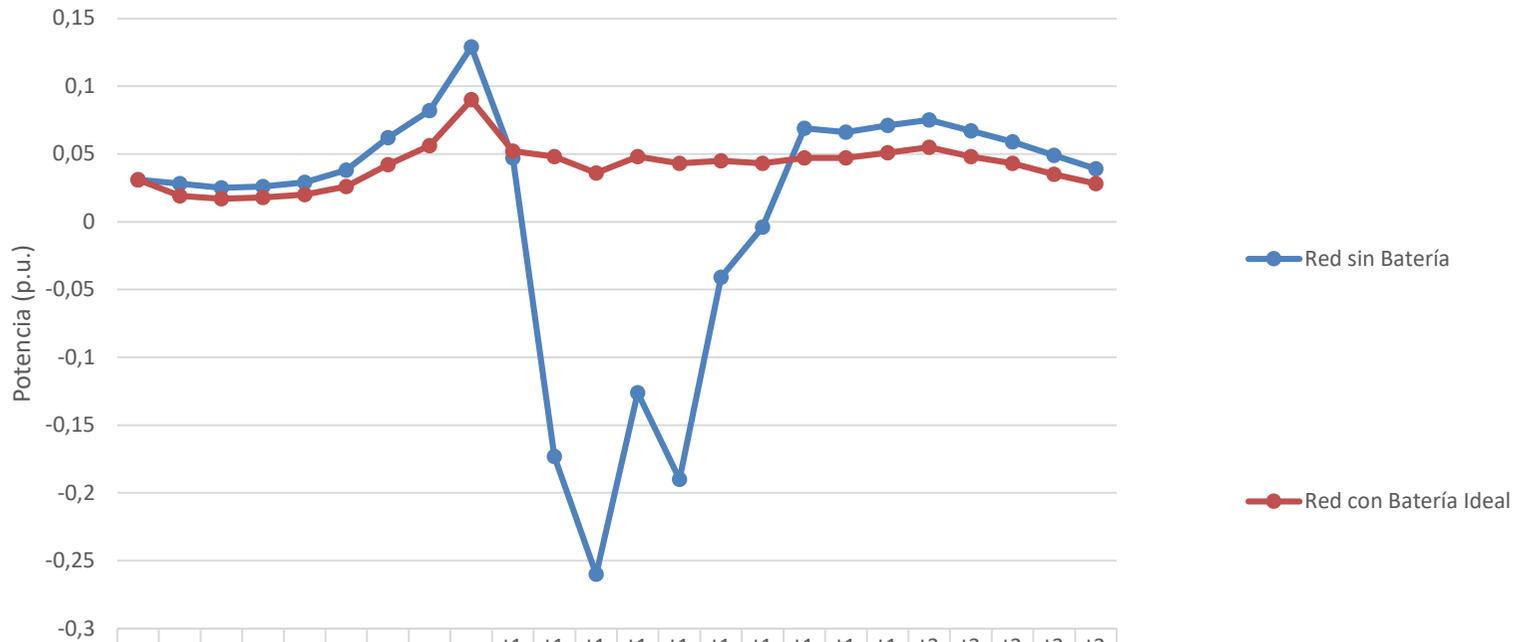


Figura 4-14 Resultado del sumatorio de pérdidas en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

Al incluir la batería la función objetivo pasa a tener un valor de 0.27 p.u. esto implica una minimización más considerable y por tanto, una mayor eficiencia de la red.

Respecto a la evolución de las pérdidas a lo largo del tiempo reflejadas en la figura 4-14, se aprecia cómo las pérdidas durante las horas de generación disminuyen, esto puede ser debido a que la batería esté cargándose en ese momento y no sea necesario que la energía tenga que circular desde el final hasta el inicio de la red para evacuar, produciéndose todas las pérdidas que aparecen en el caso sin batería. Este comportamiento de la batería es el que se espera a priori para solventar dichas pérdidas.

Potencia del Nudo Slack



	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Red sin Bateria	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
Red con Bateria Ideal	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0

Figura 4-15 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

En la figura 4-15 se aprecia cómo durante las horas de generación fotovoltaica el nudo Slack pasa de ceder energía, en la situación sin batería, a absorberla en la situación con batería. El nudo Slack es más cercano a las cargas que la última generación de la red situada en el nudo 8, por tanto, no es de extrañar que el programa considere como opción más eficiente cargar la batería y absorber un pequeño valor de energía del nudo Slack antes de que llegue a satisfacer todas las cargas con la propia energía generada. El nudo 9 sigue albergando un pico de potencia por la situación antes mencionada durante el análisis de la figura 4-6.

Respecto al periodo de tiempo t1, al igual que ocurría durante el proceso de validación del análisis, durante el primer periodo la batería está forzada a mantenerse el estado inicial de energía almacenada, por lo que está obligada a no actuar en el instante inicial.

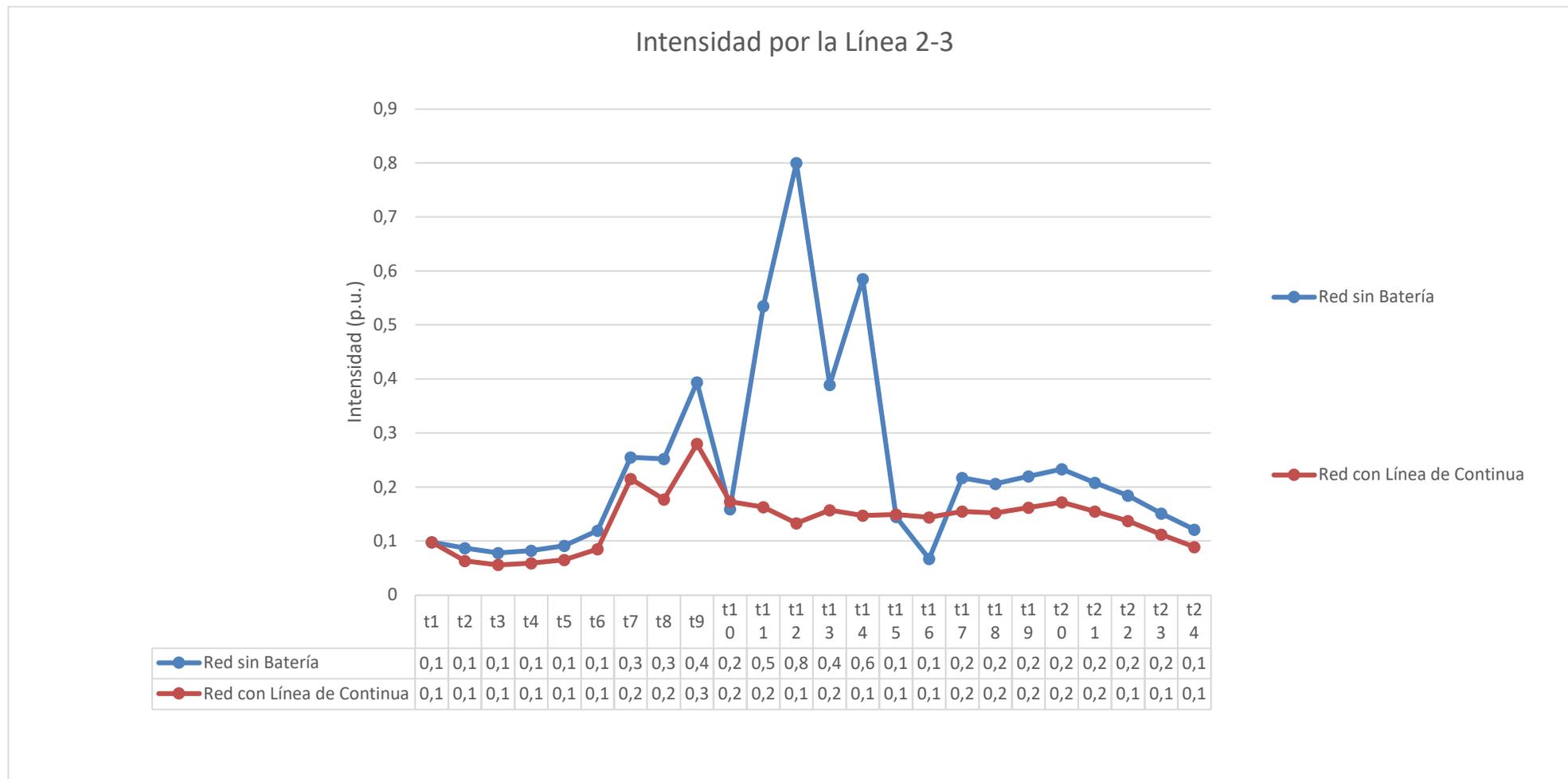


Figura 4-16 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

En la gráfica 4-16 se aprecia cómo los valores de intensidad por la rama 2-3 durante la generación se han reducido ya que no se hace un uso excesivo del nudo Slanck como en la situación sin batería. También se aprecia cómo los valores oscilan en menor medida que en la situación anterior, esto hace que no aparezcan picos de intensidad. El hecho de reducir la intensidad por esta durante el tramo horario de no generación hace pensar que la batería puede estar descargándose y haciendo por tanto que el nudo Salck reduzca también su uso durante estos periodos de tiempo, de esta manera se aprovecha la energía almacenada en la batería por lo que sería la situación a esperada.

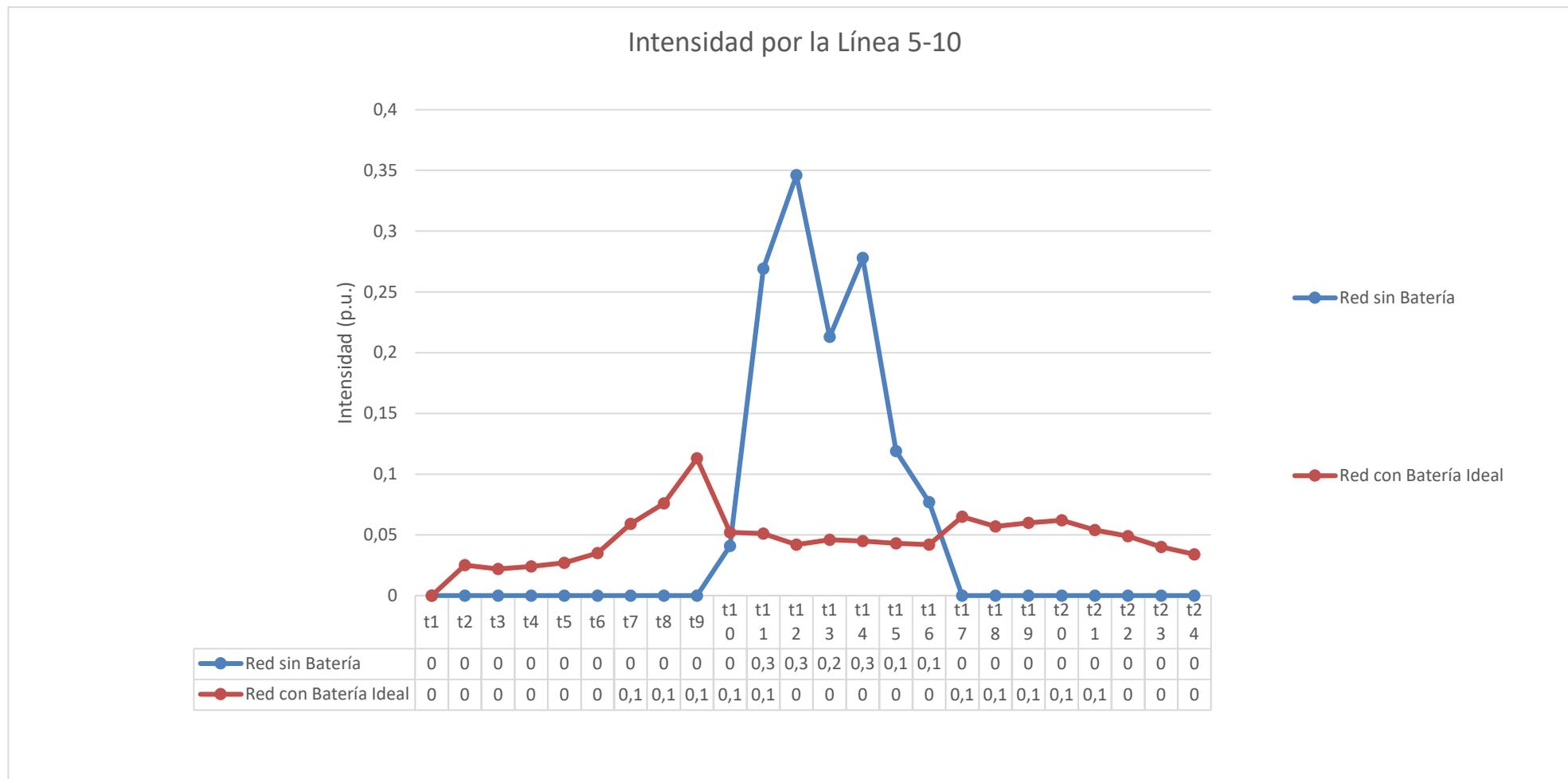


Figura 4-17 Resultado de la intensidad por la línea 5-10 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

Debido a la aparición de la batería el nudo 10 deja de ser un simple nudo de generación ya que a este es al que además de la generación fotovoltaica se le conecta directamente la batería. En la figura 4-17 se puede apreciar cómo la evolución de la intensidad por la rama 5-10 deja de presentar el mismo esquema que el marcado por la generación fotovoltaica. Esto implica que la batería se encuentra en funcionamiento en todo momento tan y excepto durante el primer periodo de tiempo tal y como se ha mencionado anteriormente.

Dicha figura fortalece la idea de que durante las primeras horas de la mañana y las últimas de la noche batería se encuentra en estado de descarga ya que la intensidad por dicha línea deja de ser nula y durante el medio día se encuentra en estado de carga. Este hecho aún no se puede corroborar ya que la representación de la intensidad no dispone de su signo, es decir, lo representa es la intensidad en módulo. Por lo que no se puede observar en dicha gráfica hacia dónde circula y la corriente y por tanto en qué estado se encuentra la batería.



Figura 4-18 Resultado de la intensidad por la línea 5-6 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

La línea 5-6 sigue siendo una línea de conexión de las generaciones conectadas a los nudos 9 y 8, los finales de la red. Por lo tanto, su finalidad es verter a la red toda esa energía generada. En la figura 4-18 se aprecia cómo no circula intensidad por dicha línea durante las horas de no generación, este hecho es el esperado ya que es el final de la red y no cuenta con ninguna carga, por lo que no tendría sentido circule intensidad.

En la vida real durante la no producción de los paneles la generación fotovoltaica consume una pequeña energía, pero este hecho no se ha considerado durante este estudio.

Los valores de intensidad que circulan por la red a lo largo de las horas de generación son mayores que los apreciados en la figura 4-17, esto es debido a que la línea 5-6 acumula la energía generada en el nudo 9 y en el 8 mientras que la línea 5-10 la única generación que ve es la del nudo 10.

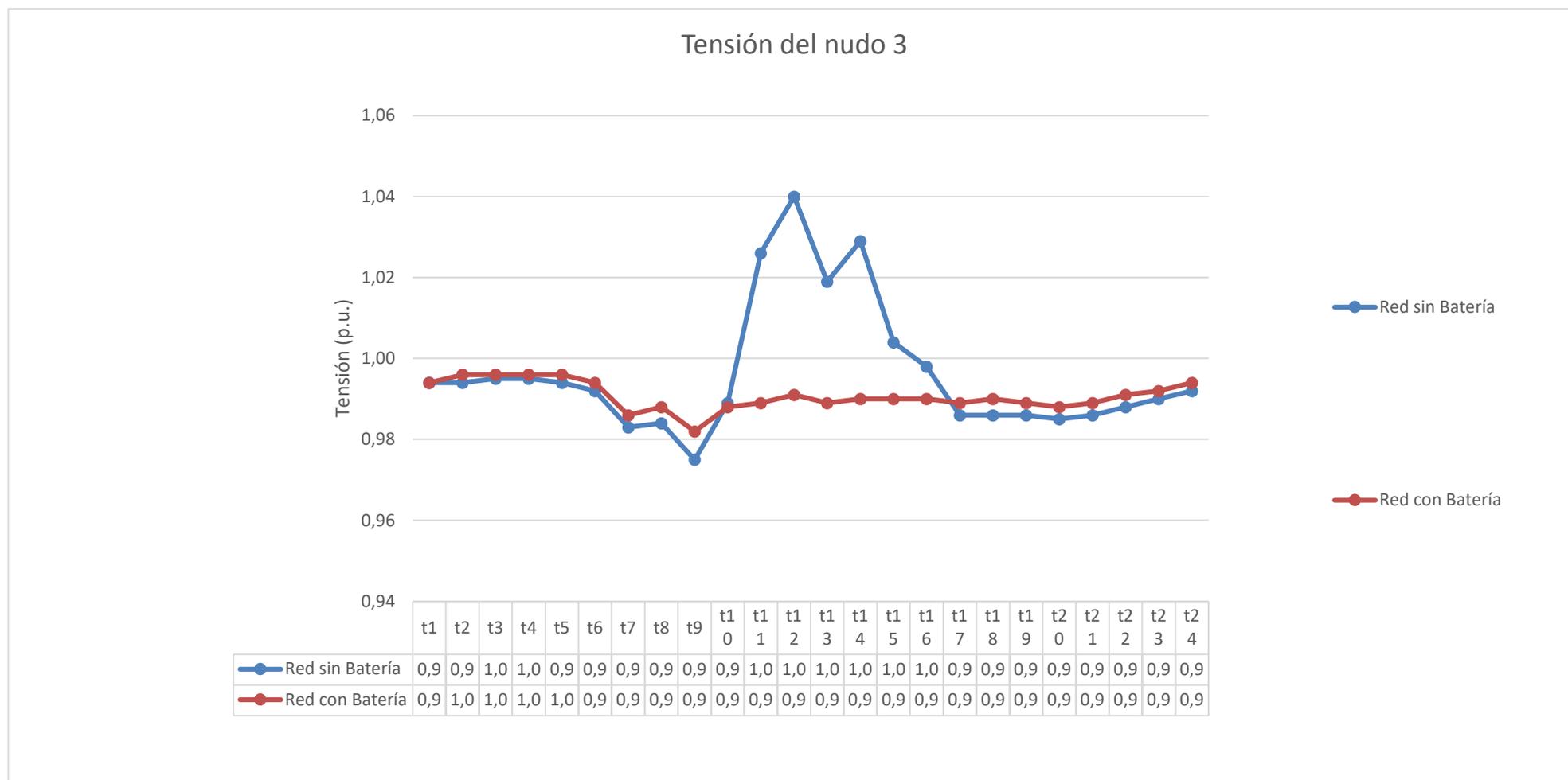


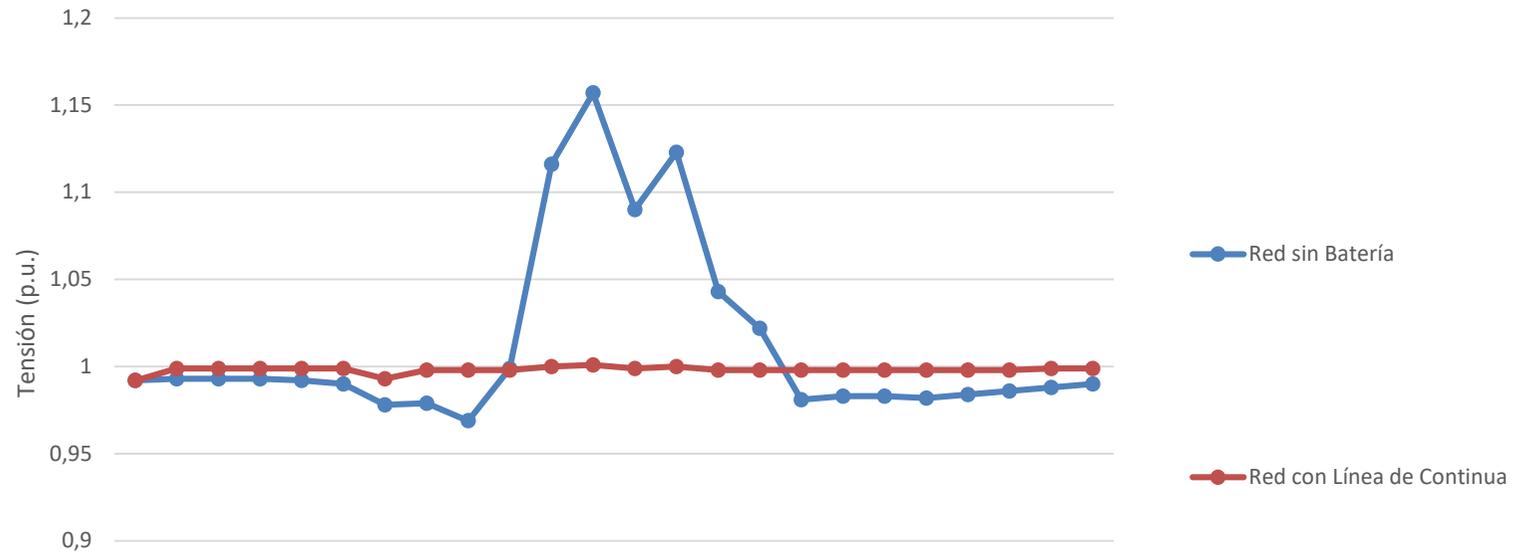
Figura 4-19 Resultado de la tensión del nudo 3 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

Durante las horas de no generación la única función de la red es encontrar la situación óptima para alimentar a las cargas conectadas, no tiene que gestionar el aumento de energía provocado por la generación.

En la figura 4-19 se aprecia cómo al introducir la batería la tensión en el nudo 2 sube, esto es debido a que la intensidad por la línea 2-3 se ha reducido respecto a la situación sin batería, tal y como se ha comentado durante este tramo horario la finalidad de la red es abastecer sus cargas por lo que la energía que circula por ella no debe ser mucho mayor a la estrictamente necesaria. Esto implica que ante una reducción de la intensidad por dicha línea la tensión debe subir para seguir aportando al nudo 12 la potencia que demanda.

En el tramo horario con generación no ocurre lo mismo, ya que en este tramo además de abastecer a las cargas la red debe gestionar el incremento de energía que le proporcionan las generaciones. Es por este motivo que aún cuando se reduce la intensidad en la rama 2-3 la tensión no aumenta, al contrario, se reduce. Durante estas horas el nudo Slack deja de ser la única fuente de energía por lo que al nudo 3 también le llega la energía fotovoltaica generada haciendo por tanto que pueda reducir su valor de tensión para poder proporcionar la potencia esperada al nudo 12.

Tensión del nudo 10



	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24	
Red sin Bateria	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,2	1,1	1,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Red con Línea de Continua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 4-20 Resultado de la tensión del nudo 10 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

En la figura 4-20 se observa cómo la tensión del nudo 10 aumenta en el tramo horario de no generación, este hecho sería justificable en el caso de que en dichos tramos horario prime la descarga de la batería. En el tramo horario de generación ocurre lo contrario, la tensión disminuye, por lo que en este tramo se entiende que prima la carga. Con este hecho se obtienen valores de tensión casi lineales en el tiempo y muy próximos al 1 p.u.

Tensión del nudo 6

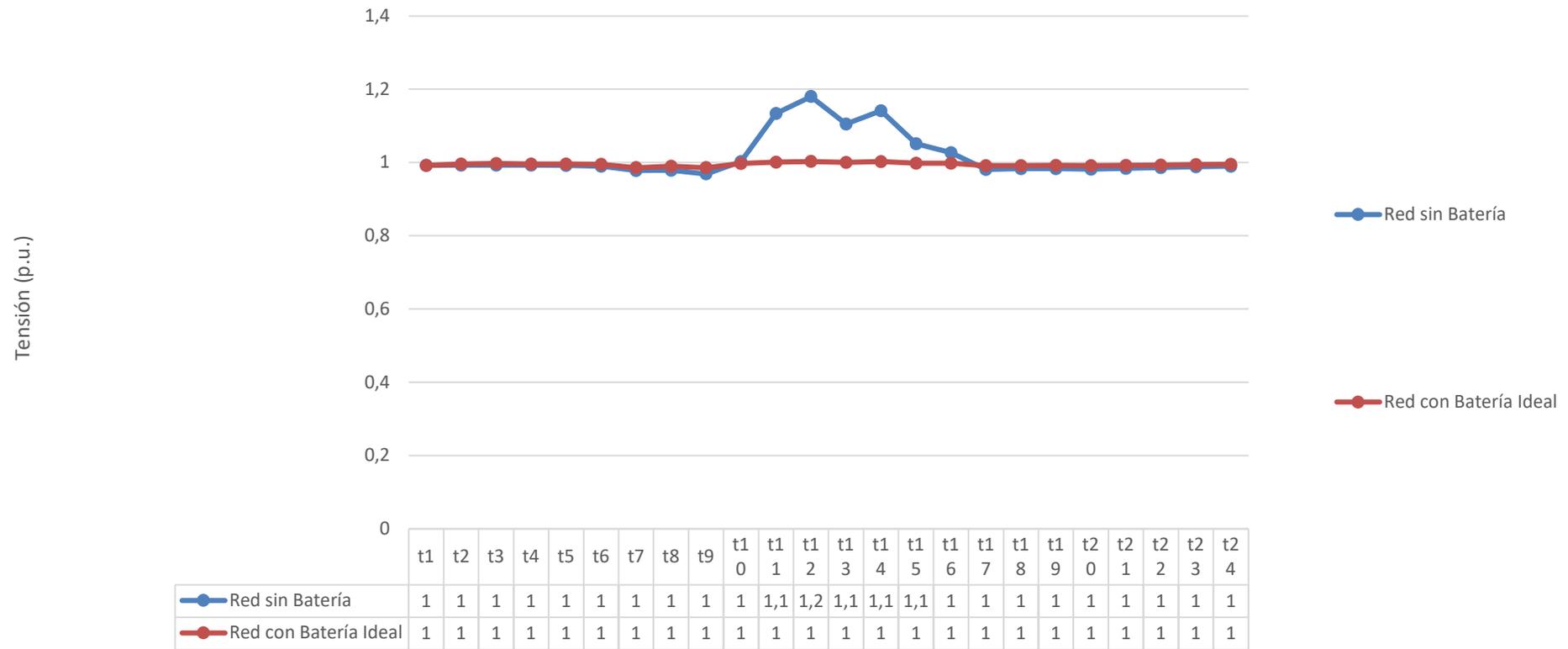


Figura 4-21 Resultado de la tensión del nudo 6 en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

En la figura 4-21 también se observa cómo los valores de tensión del nudo 6 pasan a ser prácticamente lineales y muy próximos al 1 p.u. reflejando así la no sobrecarga del nudo. La representación de esta tensión sigue haciendo pensar que la batería descarga prioritariamente en las horas de no generación y carga en las horas de generación.

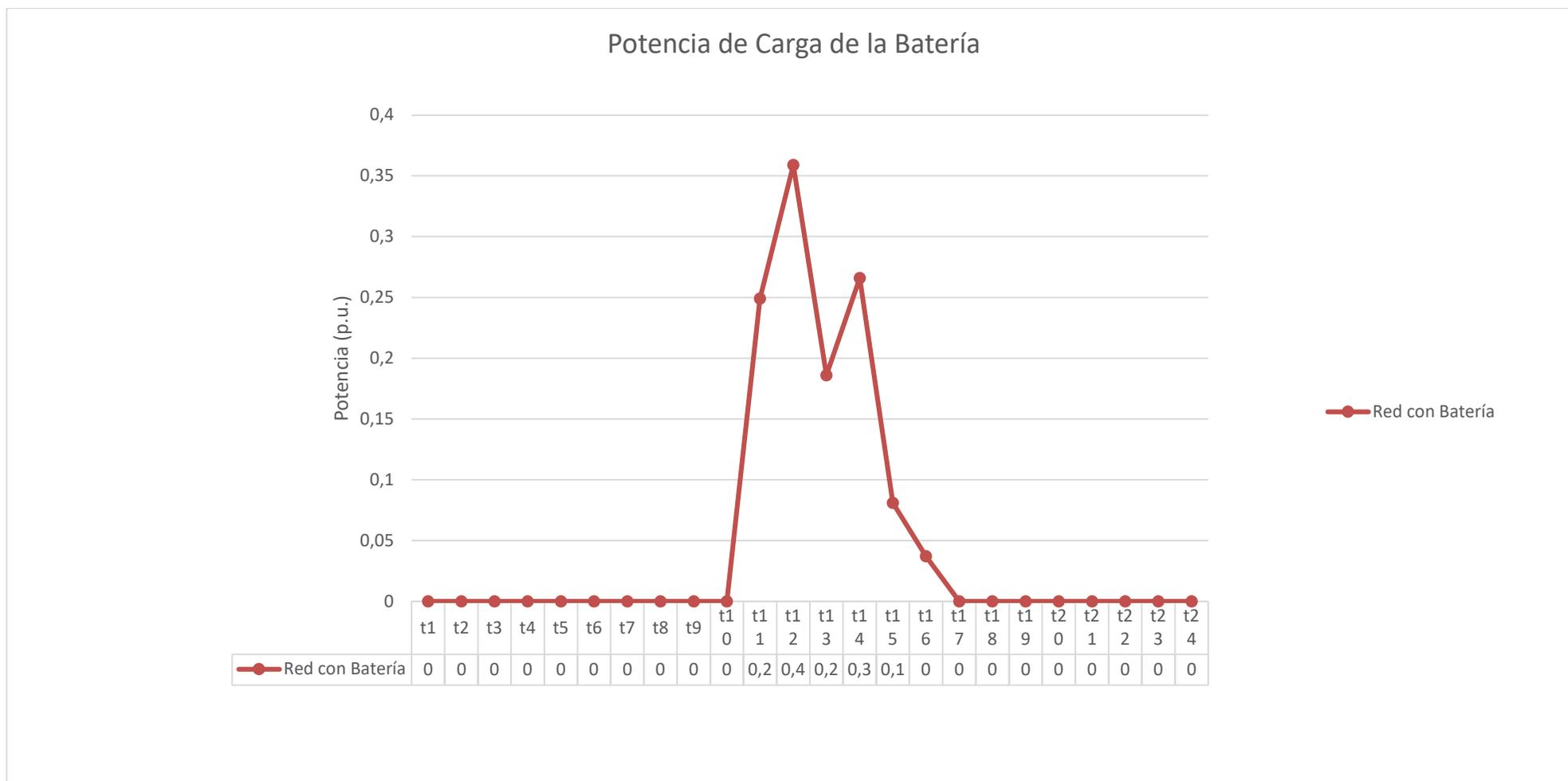


Figura 4-22 Resultado de la potencia de carga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

Finalmente, la figura 4-22 confirma que la batería se encuentra cargando durante la mayor parte del tramo horario de generación, durante las dos primeras horas y la última no carga ya que la irradiancia no es lo suficientemente alta como para tomar esta decisión.

La evolución de la carga presenta un perfil parecido a la evolución de la generación, esto es debido a que es esta generación la que debe solventar e impedir que le evacúe por el

nudo Slack para reducir de esta manera las pérdidas provocadas durante su transporte.

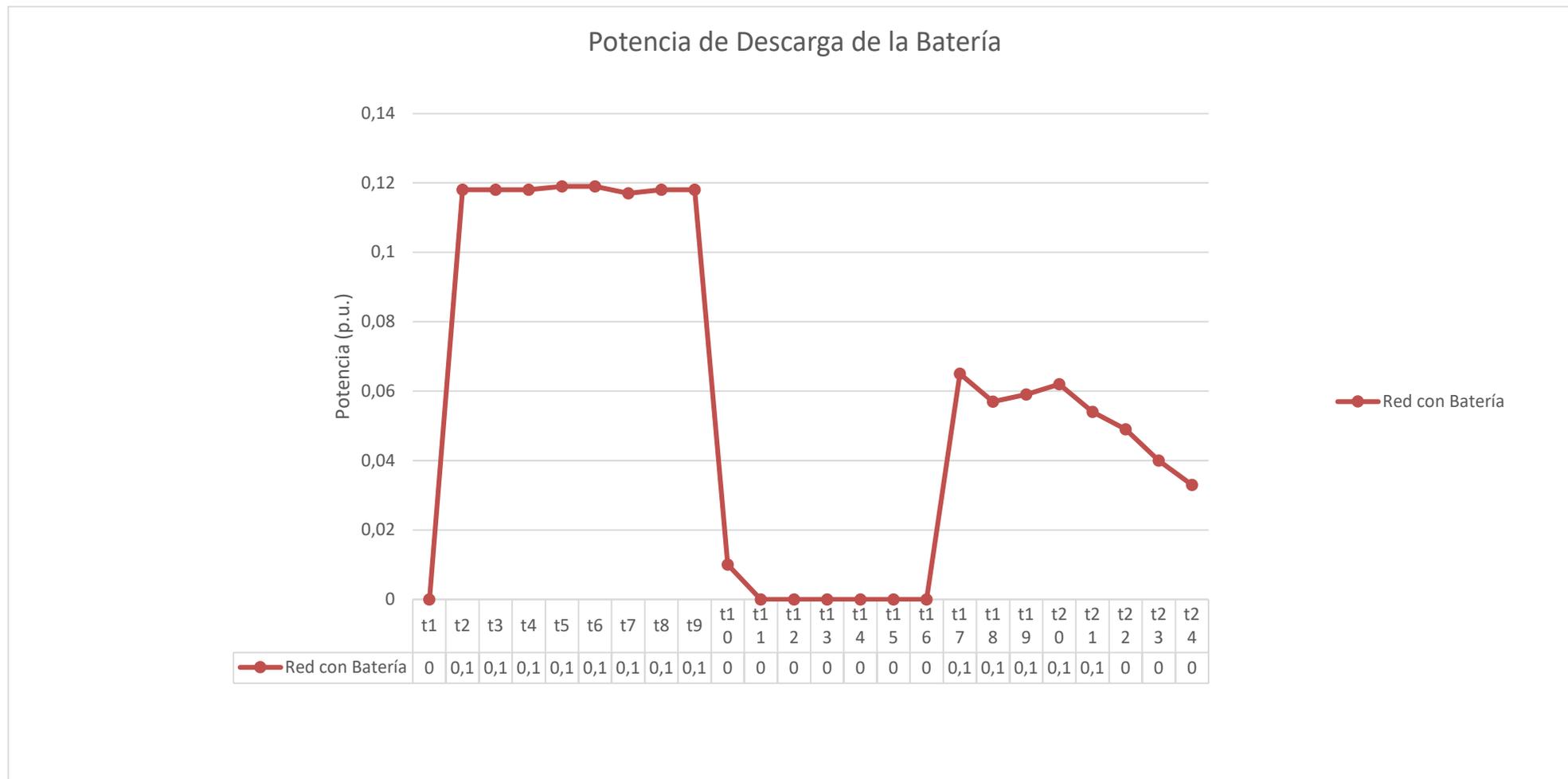


Figura 4-23 Resultado de la potencia de descarga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

De igual manera, la figura 4-23 confirma que el modo descarga de la batería prima durante las horas de no generación, durante el primer tramo de la mañana la batería se descarga

considerablemente aunque las cargas no sean muy elevadas para poder llegar al medio día con la mayor posibilidad de carga posible ya que es el tramo horario que aporta mayores pérdidas y por tato es el que mayor apoyo por la batería necesita. En las horas nocturnas la batería sigue descargándose aunque no tan llamativamente como en las primeras horas de la mañana al no estar condicionada por un aumento drástico de generación en periodos de tiempo posteriores.

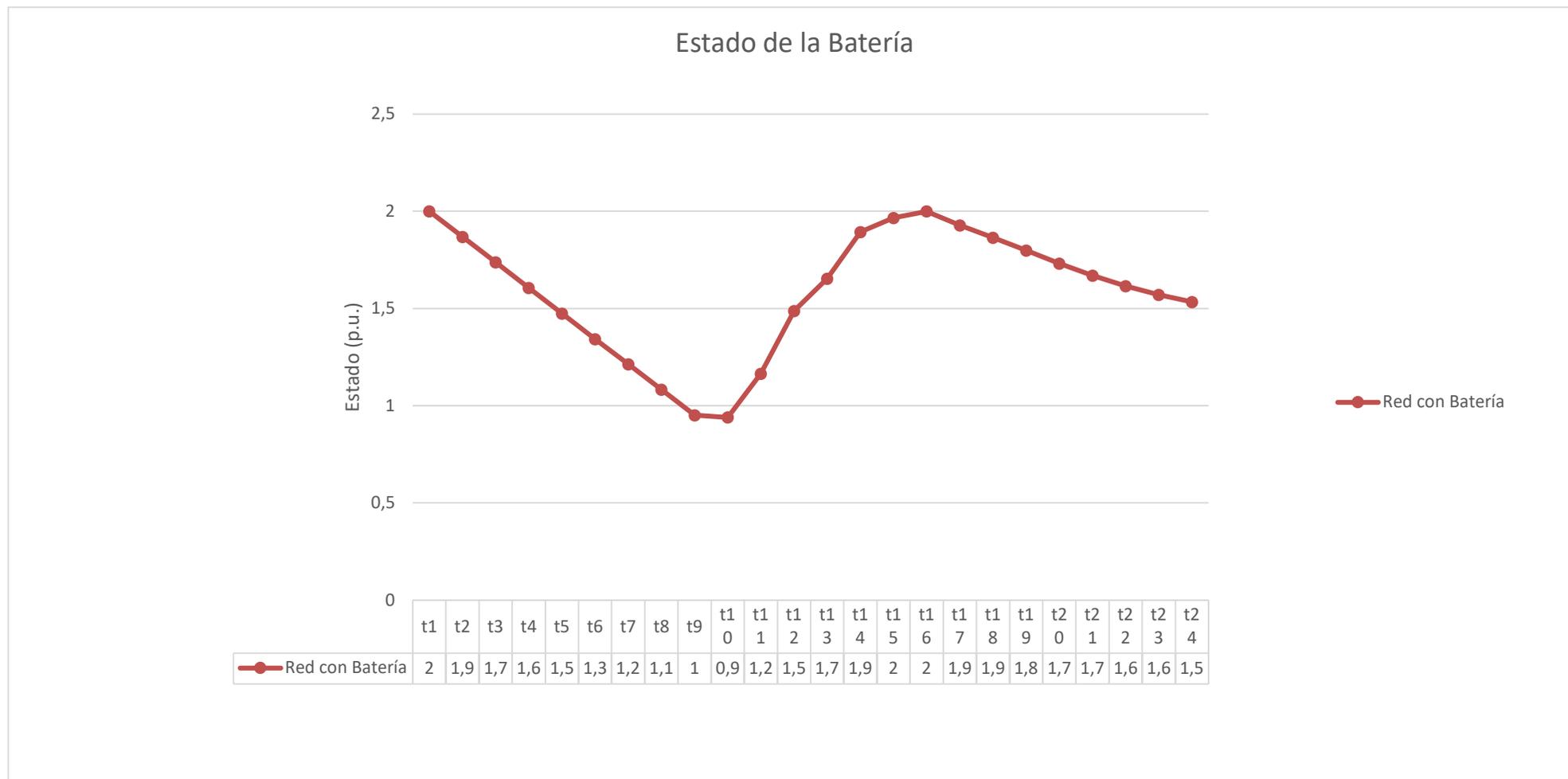


Figura 4-24 Resultado del estado de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería y con batería

La figura 4-24 representa la evolución de la energía de la batería provocada por la carga y descarga antes analizada. En esta figura se aprecia de manera más clara cómo la batería toma la decisión de descargarse drásticamente durante las primeras horas de la mañana ya que a las 3 de la tarde necesita llegar al estado inicial de carga. También se refleja la descarga de manera más relajada durante el último tramo horario del día tal y como se había explicado anteriormente.

4.3 Resultados del conexionado de una batería en el nudo 10 de la red a escala de baja tensión a través de una línea de continua

Al igual que durante el proceso de validación, a la nueva red de estudio también se le va a añadir una línea de continua que funciona como conexionado intermedio entre la batería y la red.

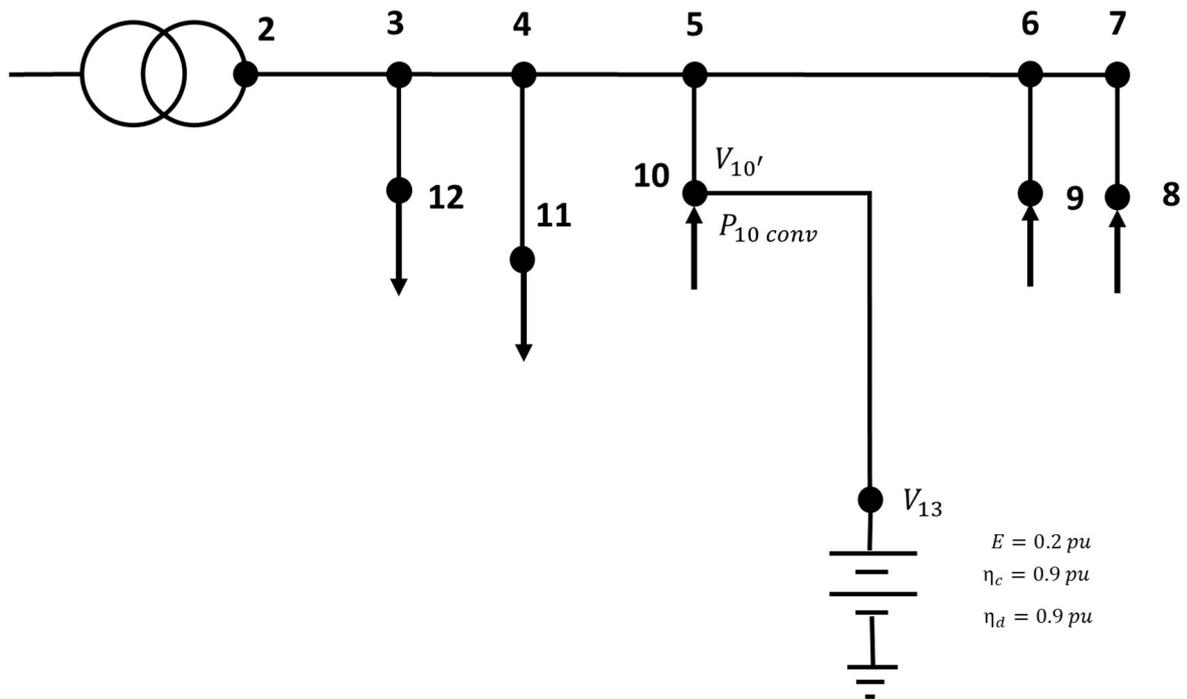


Figura 4-25 Red a escala de baja tensión de los laboratorios con batería y línea de continua

Al igual que los parámetros de la batería, los parámetros de la línea de continua siguen siendo iguales a los incluidos durante la validación del modelo, de esta manera se se hace una evolución del estudio escalonada ya que dichos parámetros ya han sido probados en una red más simple.

Pérdidas de la Red

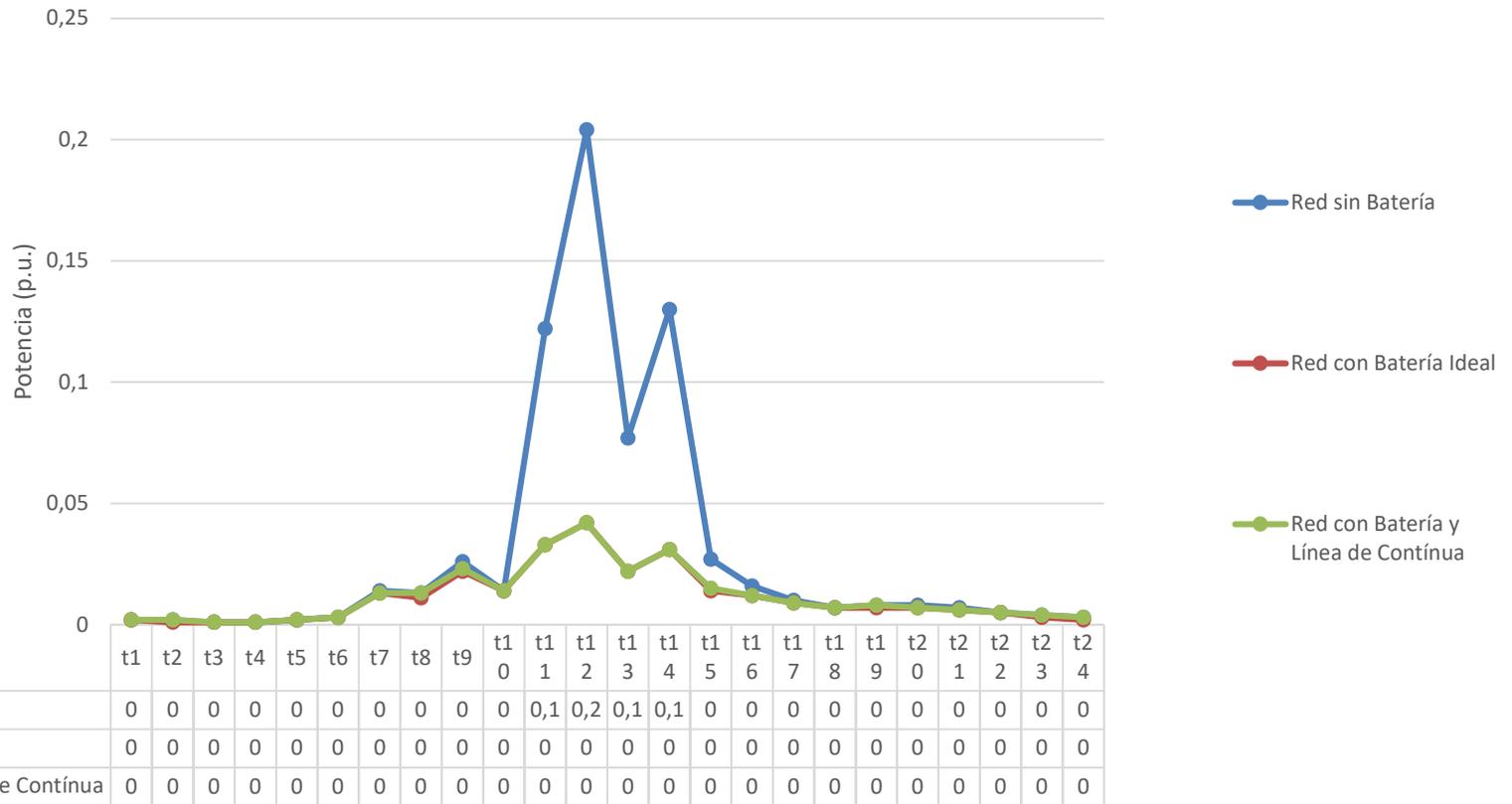


Figura 4-26 Resultado del sumatorio de pérdidas en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

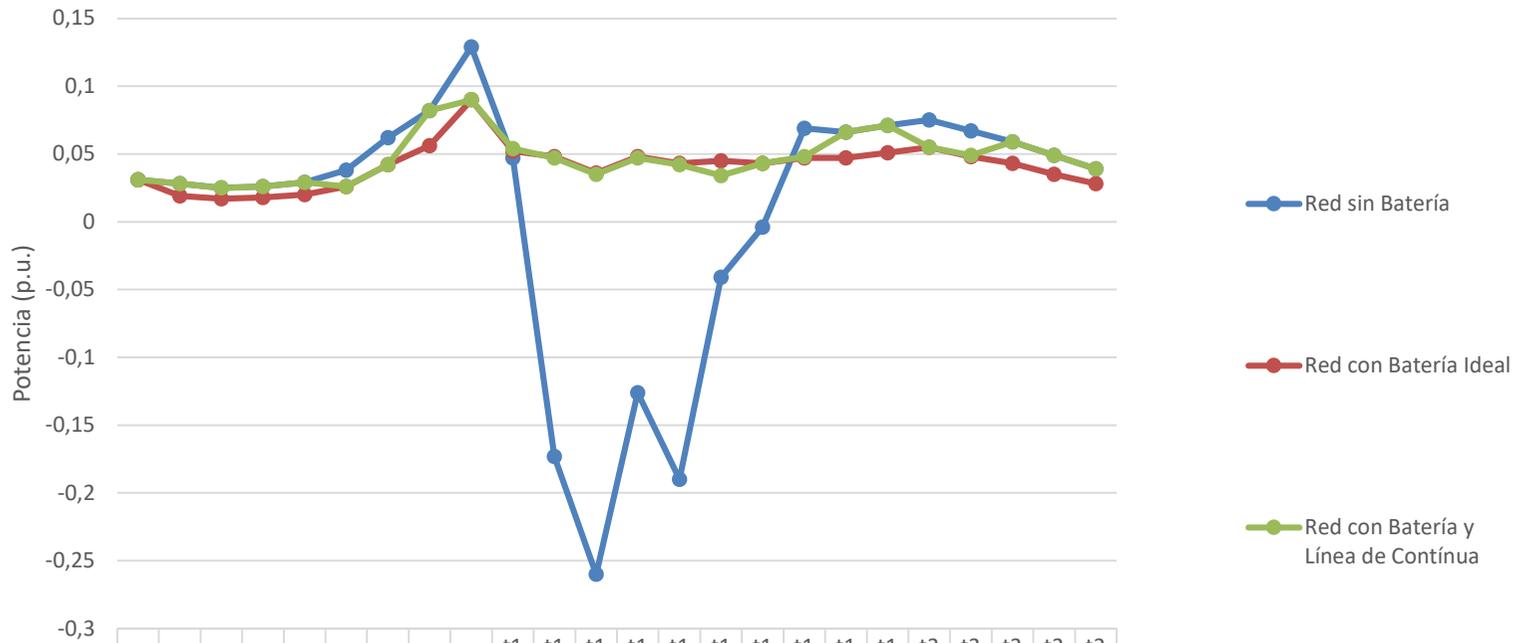
Al incluir la línea de continua la función objetivo pasa a tomar el valor 0,277 p.u. este valor es 0.007 p.u. mayor que el de la situación con batería y sin línea de continua pero aún así sigue siendo notoriamente más reducido que el de la situación sin batería por lo que este escenario también se considera una optimización de la red estudiada.

Los valores de pérdidas a lo largo del tiempo reflejados en la figura 4-26 son prácticamente idénticos a los obtenidos en el escenario sin línea de continua, se obtienen valores muy cercanos al cero durante todos los periodos de tiempo atenuando así las pérdidas producidas durante la generación fotovoltaica producidas en el escenario sin batería.

Los puntos que varían ligeramente respecto a la situación sin línea de continua son el t2 y t8 para entender qué ocurre en estas horas de la mañana es necesario obtener más resultados.

Teniendo en cuenta la evolución de las pérdidas de la figura 4-26 en este nuevo escenario se entiende que la red está buscando comportarse de la misma manera que cuando se conectaba la batería directamente pero intentando solventar las pérdidas de la línea de continua. Para verificar esto es necesario seguir observando resultados.

Potencia del Nudo Slack



	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Red sin Bateria	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	-0	-0	-0	-0	-0	-0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
Red con Bateria Ideal	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0
Red con Bateria y Línea de Continua	0	2,8	0	0	2,9	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0	0

Figura 4-27 Resultado de la potencia del nudo Slack en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

Ya que las pérdidas son prácticamente iguales en los dos escenarios que incluyen batería, los valores de potencia del del nudo Slack y las potencias de carga y descarga de la batería deben ser parecidos, pero no idénticos, ya que al incluir la línea de continua se aumentan las pérdidas en el momento en el que se pone en funcionamiento la batería y por lo tanto, se debe tomar una nueva decisión para solventar estas pérdidas.

En la figura 4-27 se observa cómo durante algunas horas de no generación la red decide aumentar la potencia absorbida del nudo Slack, esto ocurre por ejemplo a las 2 y a las 8 de la mañana, puntos horarios en los que se había observado que las pérdidas subían respecto al escenario anterior. Esto puede ser debido a que la batería no se encuentre descargando en dichas horas o a que no descargue al nivel suficiente como para abastecer a las cargas. Lo que sí implica este hecho, es que el incremento de potencia del nudo Slack hace que las pérdidas aumenten, aunque para terminar de entender esta situación será necesario observar cómo se comporta la batería en dichas horas.

Por el contrario, la figura 4-27, representa cómo al incluir la línea de continua la potencia del nudo Slack disminuyen ligeramente los valores potencia absorbida del nudo Slack, sobre todo a las 3 de la tarde. Este hecho se justificaría considerando la batería reduce en ese momento su nivel de carga, necesitando por tanto menos potencia absorbida por el nudo Slack, de esta manera se reduciría el uso de la batería durante el tramo horario de generación. Este hecho encajaría con la hipótesis de reducción del uso de la batería durante el primer tramo horario ya que al no descargarse de manera tan considerable, durante dicho tramo, esta dispone de menor posibilidad de carga durante las horas de generación.

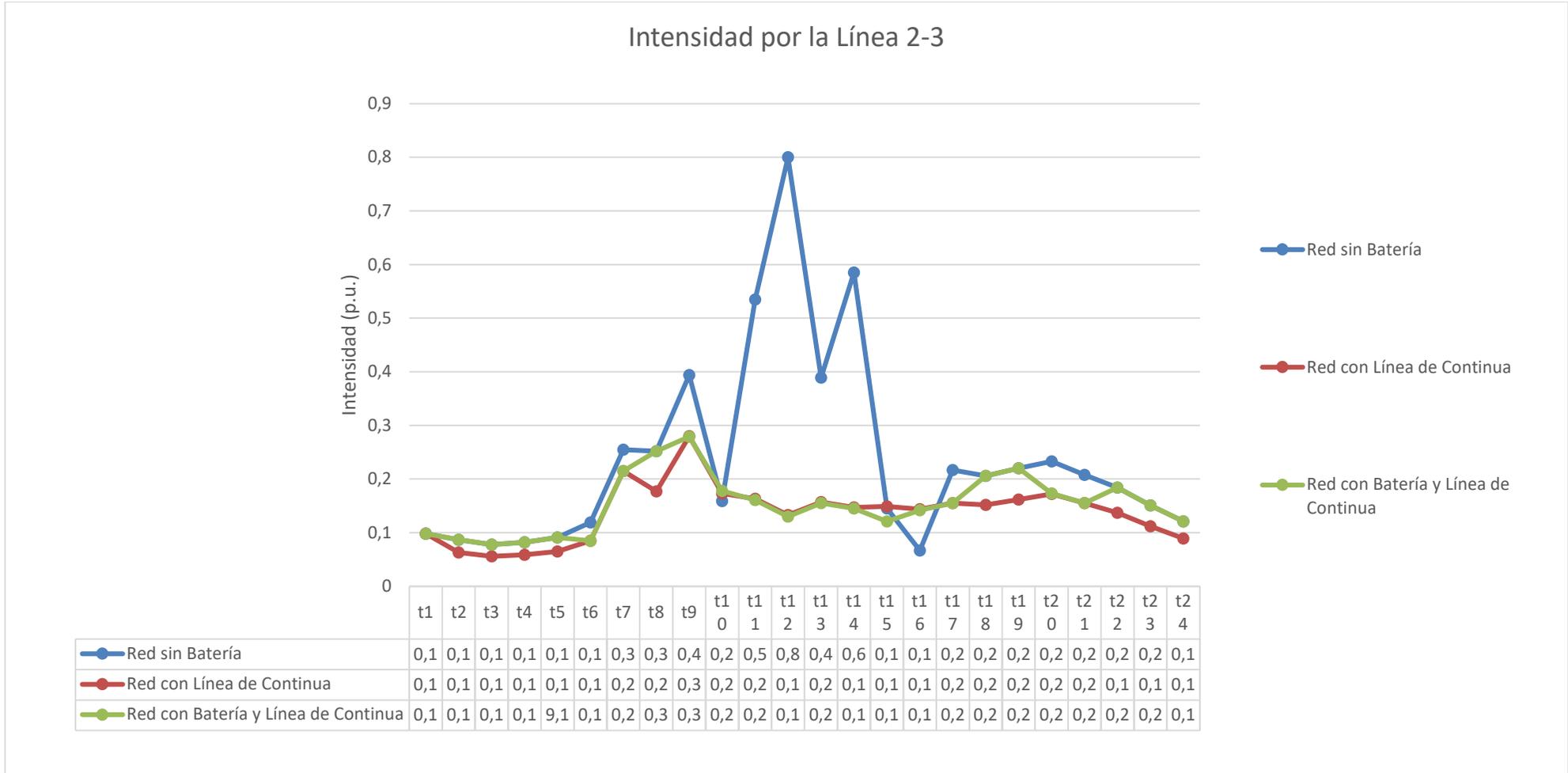


Figura 4-28 Resultado de la intensidad por la línea 2-3 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

Figura 4-28 representa la intensidad que circula por el nudo Slack, por tanto, cuenta con los mismos puntos a destacar que la evolución de la potencia Slack al ser la línea que conecta dicho nudo con la red.

En ella se sigue apreciando el aumento considerable del nudo Slack a las 8 de la mañana, lo que ocurre en esta hora de la mañana se terminará de analizar con la obtención de los

resultados de la batería.

En dicha figura también destaca el incremento del uso del nudo Slack a las 6 y a las 7 de la tarde, estos periodos no se apreciaban en la figura 4-26 al ser tan parecido los valores de las pérdidas durante toda la evolución en comparación con la situación sin línea de continua. La explicación de lo que ocurre en dichos tramos horarios puede ser a misma que para t8, aunque habrá que esperar a obtener los resultados de la batería.

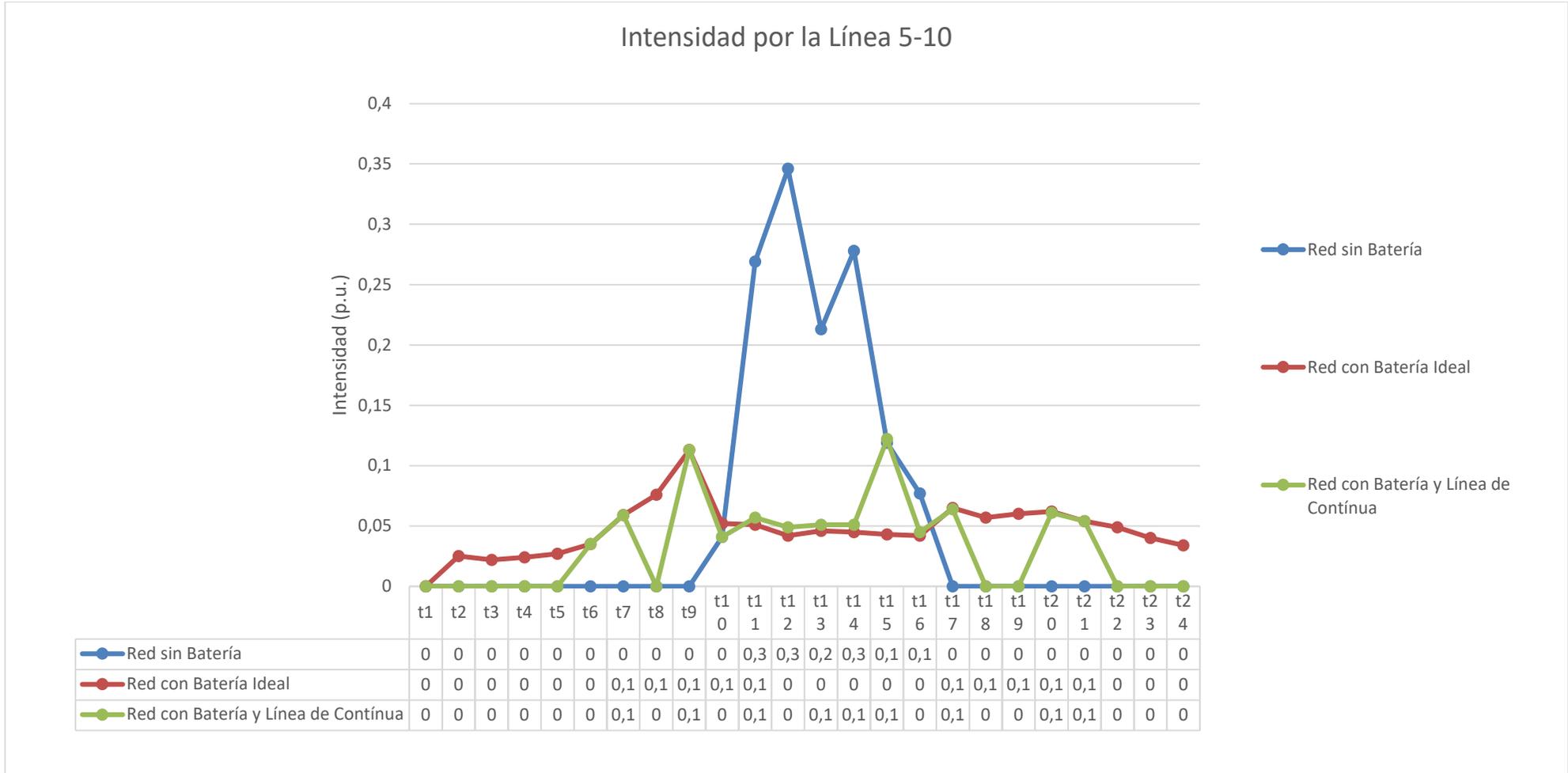


Figura 4-29 Resultado de la intensidad por la línea 5-10 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 4-29 ya se confirma la reducción del uso de la batería, al menos durante el horario de no generación. En dicho horario se aprecia como únicamente la batería actúa de 5 a 8 y de 8 a 9 de la mañana y de 5 a 6 y de 7 a 10 de la noche. Este hecho se aprecia en la gráfica al ser los únicos tramos horarios en los que circula intensidad por la línea 5-10. A esta línea sólo están conectadas la batería y la generación fotovoltaica y al no estar generando la fotovoltaica, la única posibilidad de que circule intensidad por esta es

que la batería esté actuando. En principio no se sabría si cargando o descargando ya que lo que se representa en la figura 4-29 es la evolución del módulo de la intensidad por lo que no proporciona información sobre el sentido de dicha intensidad.

Respecto a las horas de generación, la intensidad por la línea 5-10 aumenta, esto debe suponer que se reduce el uso de la batería en dicho tramo horario y por tanto se vierte a la red una mayor parte de la energía producida por la generación que la que se vertía en la situación en la que se conectaba la batería directamente a la red el punto más destacado es el de las 3 de la tarde, como era de esperar al conocer la reducción del uso del nudo Slack durante esta hora, la generación del nudo 10 vierte una mayor energía a la red que en la situación anterior.

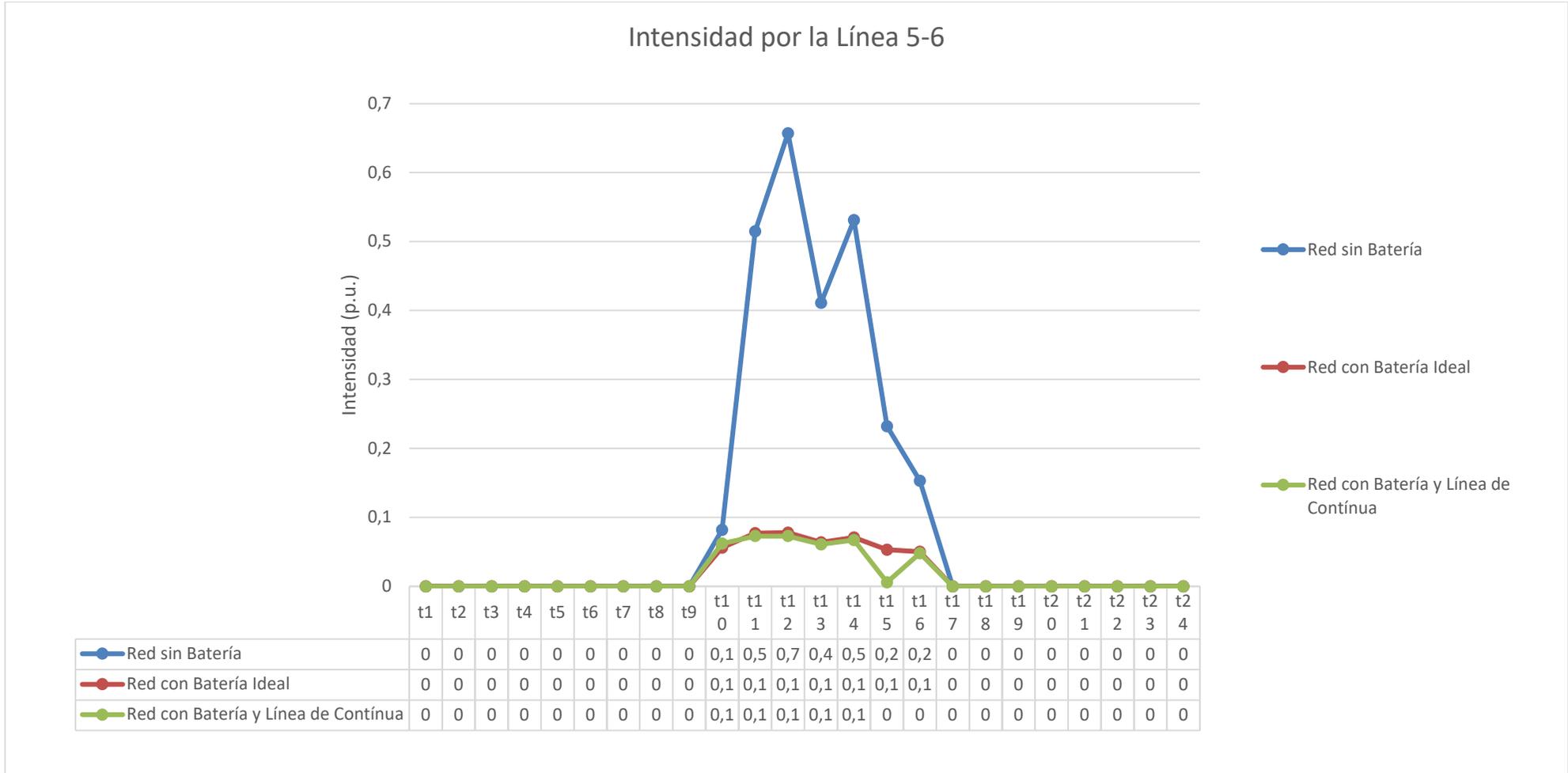
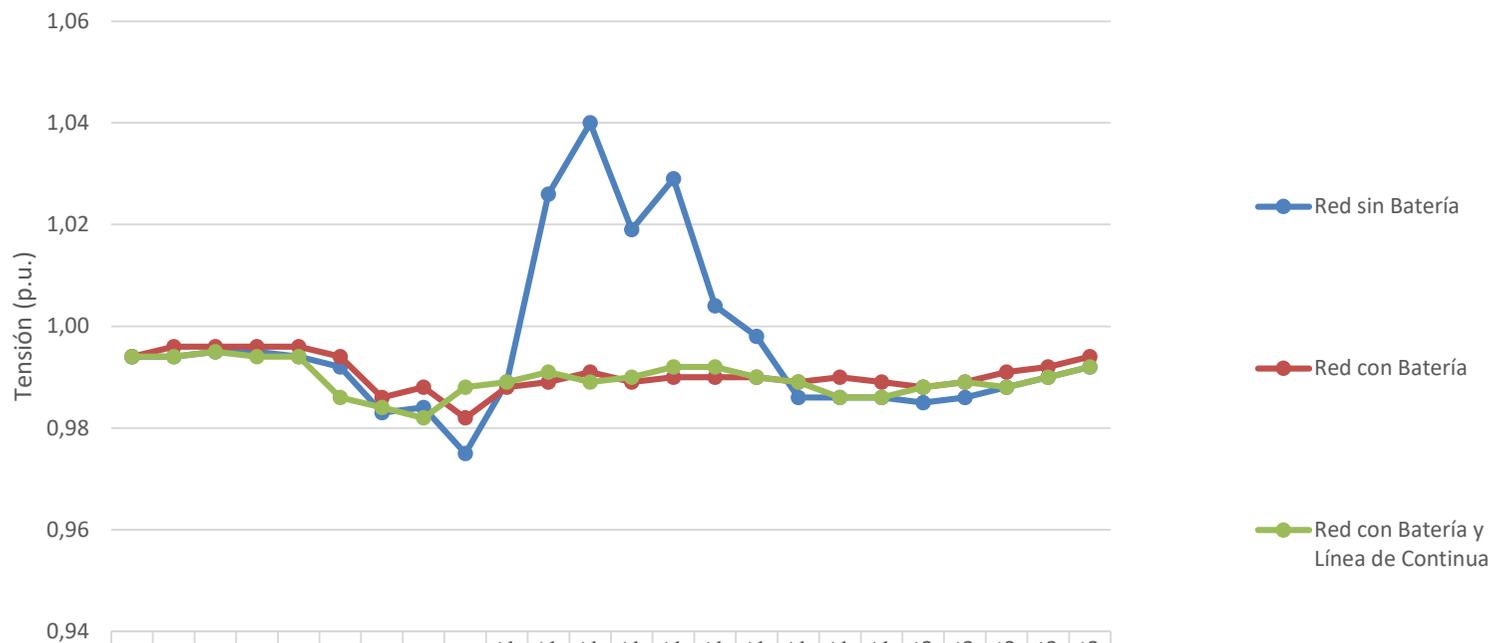


Figura 4-30 Resultado de la intensidad por la línea 5-6 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

Respecto a la evolución de la intensidad por la línea 5-6 representada en la figura 4-30 ocurre lo mismo que en el caso sin línea de continua. Durante la no generación no circula intensidad al tratarse de una conexión de pura generación. La diferencia respecto a la situación anterior aparece durante la generación, durante las 10 de la mañana la intensidad por dicha línea sube ligeramente debido a que la intensidad de la línea 5-10 baja. Por el contrario, desde dicha hora la intensidad comienza a bajar debido al mayor consumo

fotovoltaico de la red por parte mientras que durante las 4 de la tarde sube al aumentar la energía que se inyecta en la línea 5-10 para cargar la batería.

Tensión del nudo 3



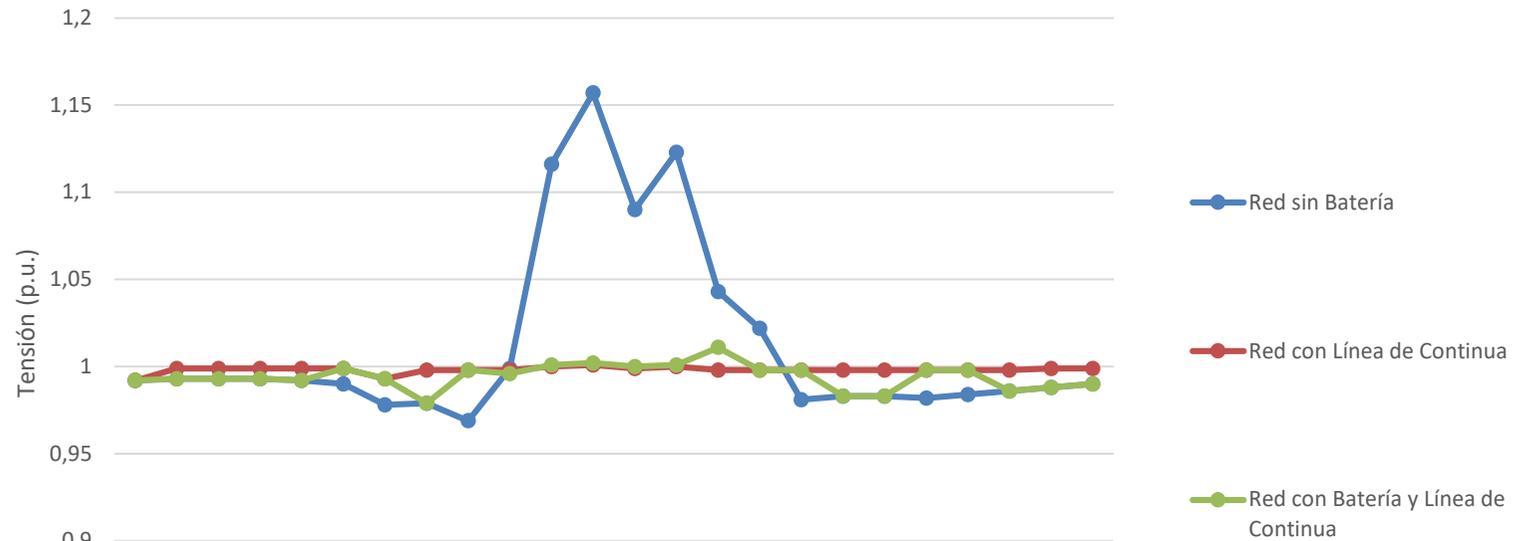
	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t1 0	t1 1	t1 2	t1 3	t1 4	t1 5	t1 6	t1 7	t1 8	t1 9	t2 0	t2 1	t2 2	t2 3	t2 4
Red sin Bateria	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Red con Bateria	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Red con Bateria y Línea de Continua	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Figura 4-31 Resultado de la tensión en el nudo 3 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 4-31 se aprecia como la tensión del nudo 3 durante el periodo de no generación disminuye al aumentar la potencia del nudo Salck y aumenta al reducir la potencia del nudo Slack ya de la potencia que tiene que suministrar al nudo 12 es la misma en todos los escenarios y por tanto necesita adaptar la tensión a las variaciones de intensidad producidas.

Durante el periodo de generación no ocurre lo mismo ya que no solo entra en juego la generación del nudo Slack si no que también aparecen las generaciones fotovoltaicas que también alimentan a las cargas por tanto estas oscilan en función a la intensidad que les proporciona el nudo Salck y las generaciones.

Tensión del nudo 10



	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24	
Red sin Batería	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,2	1,1	1,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Red con Línea de Continua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Red con Batería y Línea de Continua	1	1	1	1	9,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 4-32 Resultado de la tensión en el nudo 10 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

En la figura 4-32 se ve representada la evolución de la tensión del nudo 10. Esta tensión varía respecto a la situación sin línea de continua según el uso de la batería aplicado en este escenario. Durante el horario de no generación, cuanto menor es la tensión del nudo menor es la descarga de la batería y, por tanto, mayor es la intensidad de la rama 5-10.

Mientras que en el horario de generación, cuanto mayor es la tensión del nudo menor es la carga de la batería y, por tanto, mayor es la corriente por la rama 5-10.

Al aumentar la intensidad por la rama 5-10 se reduce la de la línea de continua al hacer un menor uso de la batería y por tanto las pérdidas de esta se reducen.

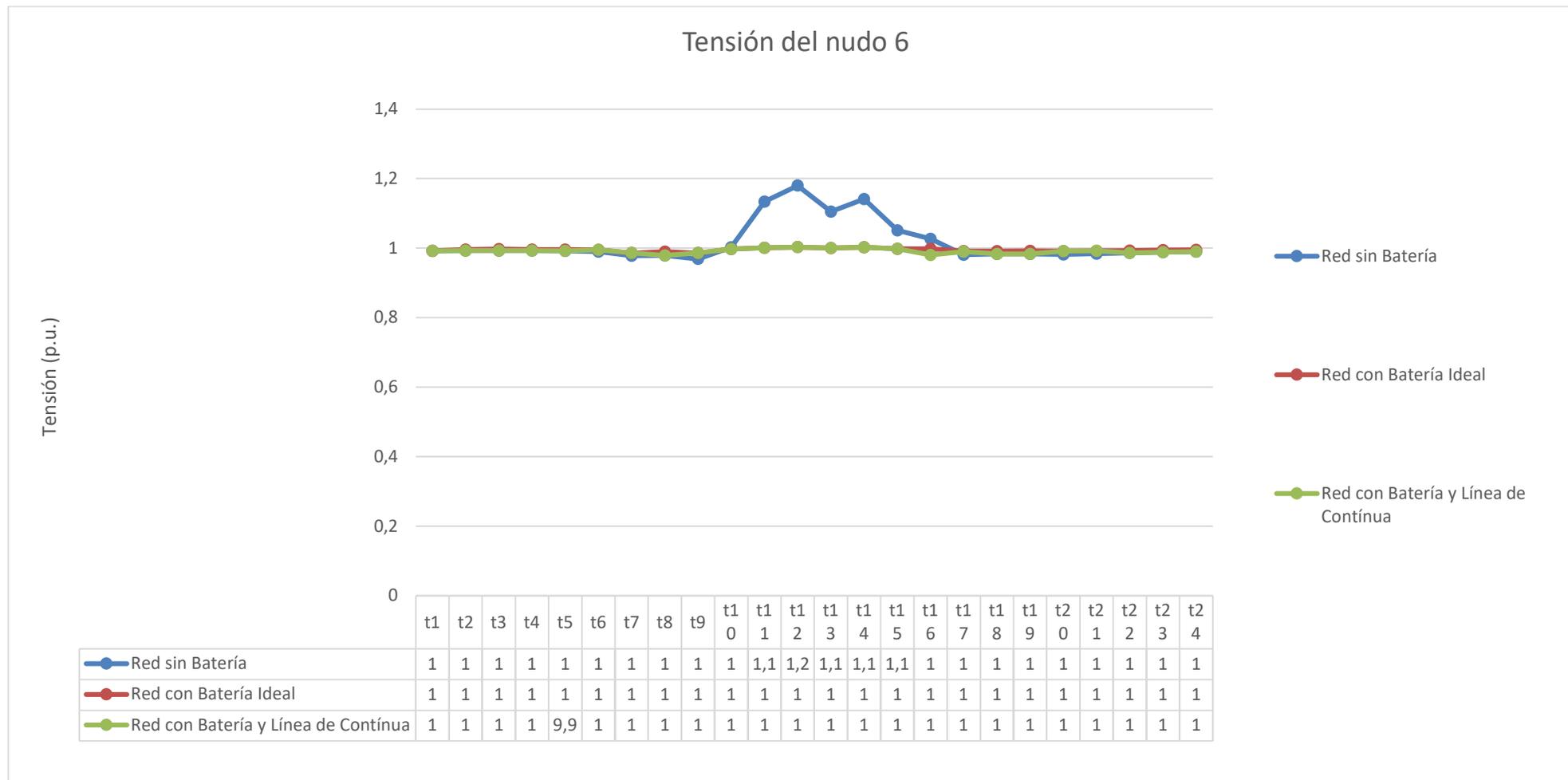


Figura 4-33 Resultado de la tensión en el nudo 6 en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

La representación de la tensión del nudo 6 en la figura 4-33 refleja cómo este escenario intenta mantener las tensiones de dicho nudo en valores muy próximos al 1 p.u. al igual que en la situación sin línea de continua.

Lo único a destacar en dicha representación es la ligera caída de tensión en a las 8 de la mañana, a las 6 y a las 7 de la tarde. Estas horas coinciden con el aumento del uso del nudo Slack en comparación con la situación sin línea de continua. Para explicar qué ocurre en este nudo durante este periodo será necesario observar el funcionamiento de la batería.

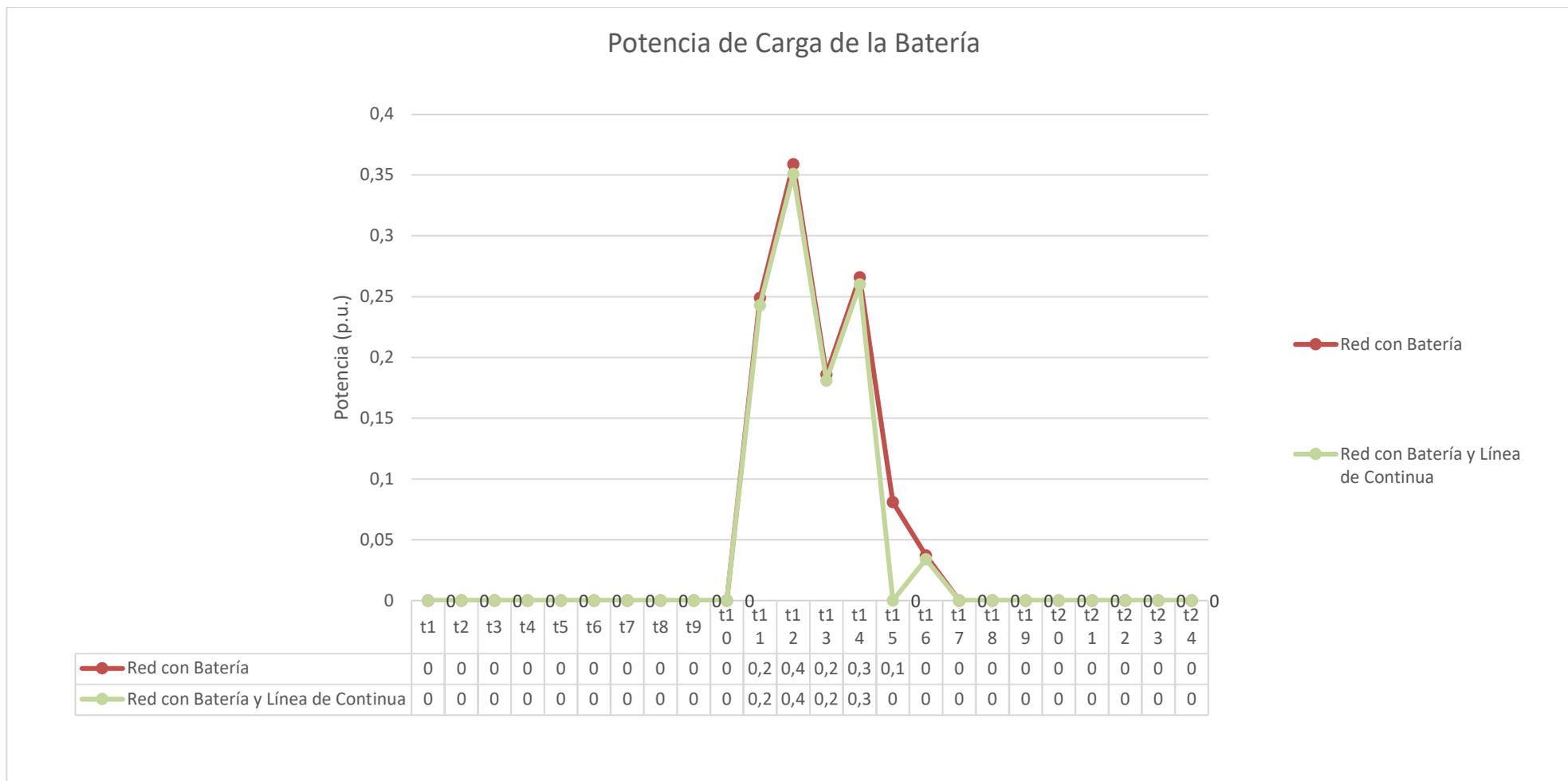


Figura 4-34 Resultado de la potencia de carga de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

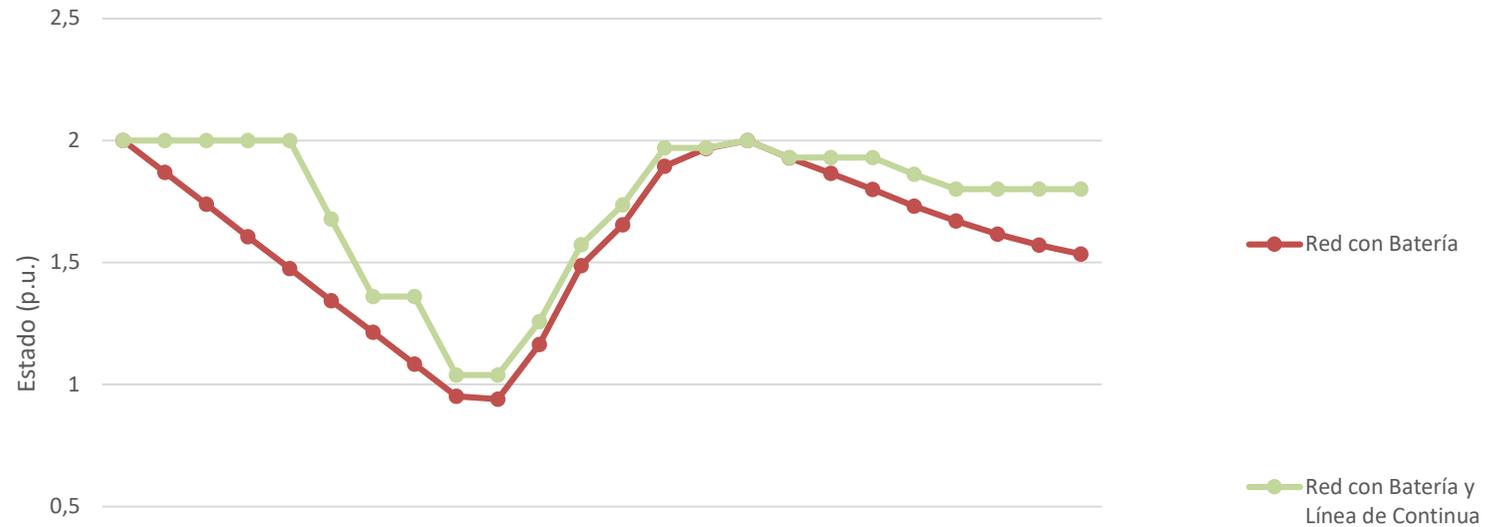
La evolución de carga de la batería representada en la figura sigue el mismo esquema que en el escenario sin línea de continua, aunque tomando valores menores, tanto es así que a las 3 de la tarde llega a ser nula dicha carga. Este hecho explica por qué a dicha hora la potencia del nudo Salck se reduce, ya que las cargas conectadas a la red pasan a alimentar en gran parte por la generación fotovoltaica.

La diferencia con la situación sin línea de continua además de la cantidad de energía almacenada y descargada, es sobre todo a velocidad con la que se hace la descarga.

Esto se entenderá mejor comparando los resultados de la evolución del estado de la batería de la figura 4-36.

Respecto a los instantes de tiempo t_8 , t_{18} y t_{19} , la batería no está cargando ni descargando. Por este motivo, la tensión que le llega es la proporcionada por el nudo Slack, al tratarse de un nudo de generación y al ser de las últimas conexiones, es normal que durante el proceso de no generación en el que la única fuente de energía es el nudo Slack esta tensión decaiga en comparación a la situación en la que sí está aportando energía la batería que se encuentra relativamente cercana al nudo.

Estado de la Batería



	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Red con Batería	2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	1	0,9	1,2	1,5	1,7	1,9	2	2	1,9	1,9	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5
Red con Batería y Línea de Continua	2	2	2	2	2	1,7	1,4	1,4	1	1	1,3	1,6	1,7	2	2	2	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8

Figura 4-36 Resultado del estado de la batería en la red de escala de baja tensión sin batería, con batería y con línea de continua

Al observar la evolución del estado de carga de la figura 4-36 en comparación con la situación sin línea de continua se aprecia cómo durante el tramo horario de no generación sigue primando la descarga de la batería y durante el tramo horario de generación prima la carga.

En esta esta nueva situación llama la atención que la batería actúa durante un tiempo menor que la situación sin línea de continua y también su rango de carga y descarga es menor. Este comportamiento es natural al aparecer la línea de continua y por tanto ya se esperaba un menor uso de la batería para reducir dichas pérdidas.

Lo verdaderamente llamativo es que la descarga de la batería durante la mañana, aunque se hace durante un periodo más corto y no llega a l rango de descarga al que llega la situación sin línea de continua, sí que se descarga a una mayor velocidad. Este hecho a la hora de valorar las pérdidas queda solventado por la reducción de tiempo de us de la batería.

5 CONCLUSIÓN

Este trabajo ha abordado el impacto de una red de continua en una red de distribución. En concreto la aparición de una red de continua que funciona como interconexión entre la red y un equipo de almacenamiento, batería.

Para ello se ha desarrollado un OPF a lo largo de determinados periodos de tiempo, para el cual se han tenido en cuenta todos los equipos conectados a la red: cargas, batería, convertidor, generaciones, etc.

El análisis ha partido de una red simple de 4 nudo para elaborar la validación del modelo propuesto. De dicha red se ha obtenido como conclusión el hecho de que, aunque aumentan las pérdidas al aparecer la línea de continua, este aumento es insignificante comparado a la reducción de pérdidas que aporta respecto a la opción sin incluir batería.

Finalmente ha evolucionado en el análisis de la red a escala de baja tensión de los laboratorios del departamento de Ingeniería Eléctrica incluyendo un perfil de potencias que se acerca al comportamiento de la sociedad actual en cuanto a consumo se refiere.

De este último análisis también se ha obtenido como conclusión que es preferible el uso de una línea de continua como conexión de la batería a la no conexión de la batería. Todo esto referido a la reducción de pérdidas.

La situación en la que se conecta la batería directamente sigue presentando menores pérdidas, aunque la diferencia es insignificante (0,007 p.u.). Esto se consigue variando la potencia del nudo Slack respecto a la opción sin línea de continua y reduciendo el uso y rango de carga y descarga de la batería, aunque no la velocidad de descarga de la batería en todos los periodos de tiempo tal y como se puede apreciar en a figura 4-36.

Como conclusión final, la aparición de la batería conectada a través de una línea de continua es una opción de optimización de una red de distribución.

6 REFERENCIAS

- [1] José María López Espada, “*Generación Distribuida: Tecnologías de Generación y Sistemas de Almacenamiento de Energía*”, 2018.
- [2] Fundación Endesa, “Generación Distribuida”.
- [3] Red Eléctrica, “*El vehículo eléctrico*”.
- [4] Red Eléctrica de España, “Vehículo eléctrico: cuestiones a plantear”.
- [5] Software Shop, “*¿Qué es GAMS?*”.
- [6] Iberdrola, “*Energía Híbrida*”
- [7] Real Academia de Ingeniería, Diccionario Español de Ingeniería.

