

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***EFEECTO DE LA ACUMULACION DE SAL EN LAS
TURBINAS DE LA PLANTA UNDIMOTRIZ DE
MUTRIKU DEBIDO A LA PANDEMIA DE COVID-19***

Alumno: Arrojo Magro, Markel

Directora: Serras Malillos, Paula

Curso: 2020-2021

Fecha: Bilbao, 29 de junio de 2021

RESUMEN

El trabajo que se presenta a continuación analiza tanto los datos de generación de potencia como las vibraciones generadas en las turbinas de la planta undimotriz de Mutriku durante los primeros seis meses del año 2020, año afectado por la pandemia provocada por la COVID-19.

El análisis se ha centrado principalmente en el estudio de los parámetros de generación de potencia y vibración de las turbinas. La generación de potencia varía por diversos motivos como la localización de las turbinas, la estación del año, la fuerza del oleaje, etc. Otra de las variables que afecta a esta generación de potencia es el aerodinamismo de los álabes, que se ve limitado cuando la sal del mar queda incrustada en los mismos. Para paliar este inconveniente la planta cuenta con un sistema automático de limpieza de agua dulce. Este sistema sufrió un fallo justo antes de que se decretara el confinamiento domiciliario que estuvo vigente durante los meses de marzo, abril y mayo de 2020 por lo que, dadas las limitaciones de movilidad impuestas, no pudo ser solventado hasta el final del confinamiento. Debido a la falta de limpieza con agua dulce en algunas de las turbinas de la planta, se produjeron cúmulos de sal que generaron pérdidas en la generación de potencia de las mismas, así como vibraciones que afectaron al funcionamiento de las turbinas.

Palabras clave: Planta undimotriz de Mutriku, columna de agua oscilante, acumulaciones de sal, potencia generada, vibraciones.

LABURPENA

Jarraian aurkeztutako lanak, 2020ko lehen sei hilabeteetan Mutrikuko olatu zentraleko turbinek sortutako potentzia datuak eta bibrazioak aztertzen du. Urte hau COVID-19ak eragindako pandemiak eragindako urtea izan da.

Analisia, turbinen potentzia sorkuntza eta bibrazio parametroak aztertzeraz bideratu da, batez ere. Potentzia sorkuntza hainbat arrazoiengatik aldatu egiten da, hala nola, turbinen kokapena, urteko sasoia, olatuen indarra, etab. Potentzia sorkuntza horri eragiten dion beste aldagai bat palen aerodinamika da, itsas gatza horietan ezartzen denean mugatua. Eragozpen horri aurre egiteko, zentralak ur gezako garbiketa sistema automatikoa du. Sistema horrek aktas bat izan zuen etxe konfinamendua agindu

aurretik, 2020ko martxoan, apirilean eta maiatzean indarrean egon zena, eta beraz, ezarritako mugikortasun mugak kontuan hartuta, ezin izan zen arazoa itxialdia amaitu arte konpondu. Ur gezarekin automatikoki ematen zen garbiketa falta horrek, zentraleko hainbat turbinetan, potentzia galerak eta baita turbinen funtzionamenduan eragina zuten bibrazioak ere sortu zituen, gatz metaketak zirela eta.

Hitz gakoak: Mutrikuko olatuen zentrala, ur zutabe oszilatzailea, gatz metaketak, potentzia sortzea, bibrazioak.

ABSTRACT

The work presented below analyzes both the power generation data and the vibrations generated in the turbines of the Mutriku wave power plant during the first six months of 2020, a year affected by the pandemic caused by COVID-19.

The analysis has focused mainly on the study of the power generation and vibration parameters of the turbines. Power generation varies for various reasons such as the location of the turbines, the season of the year, the strength of the waves, etc. Another variable that affects this power generation is the aerodynamics of the blades, which is limited when sea salt is embedded in them. To deal with this inconvenience, the plant has an automatic fresh water cleaning system. This system suffered a failure just before the home confinement was decreed, which was in force during the months of March, April and May 2020. Therefore, given the mobility limitations imposed, it could not be solved until the end of the confinement. Due to the lack of cleaning with fresh water in some of the turbines of the plant, accumulations of salt were produced that generated losses in their power generation, as well as vibrations that affected the operation of the turbines.

Key words: Mutriku wave power plant, oscillating water column (OWC), salt accumulations, power generation, vibrations.

ÍNDICE

RESUMEN	2
LABURPENA	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
LISTA DE ACRÓNIMOS	8
1. INTRODUCCIÓN	9
2. CONTEXTO.....	20
2.1 HISTORIA DEL PUERTO DE MUTRIKU	20
2.2 OBRA CIVIL	21
2.3 PLANTA UNDIMOTRIZ DE MUTRIKU	22
2.4 MATERIAL DE LAS TURBINAS Y CORROSIÓN	24
3. OBJETIVOS	27
4. DATOS.....	28
5. RESULTADOS	34
5.1 COMPARATIVA GENERAL RESPECTO AL AÑO 2019	34
5.2 GENERACIÓN DE POTENCIA EN LAS TURBINAS DE ESTUDIO	36
5.3 EFECTO DE LA FALTA DE LIMPIEZA REGULAR CON AGUA DULCE EN LA GENERACIÓN DE POTENCIA DE LAS TURBINAS EN DÍAS CONCRETOS	41
5.4 ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN LAS TURBINAS DE ESTUDIO	65
6. CONCLUSIONES	75
7. AGRADECIMIENTOS.....	77
8. DIAGRAMA DE GANTT.....	78
9. BIBLIOGRAFÍA	79
10. ANEXOS	83
10.1 PLANOS DE LA PLANTA UNDIMOTRIZ DE MUTRIKU	83
10.2 CÓDIGO R DE PREPROCESADO DE DATOS	87

10.3 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE CAJAS GENERAL	88
10.4 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE CAJAS DOS TURBINAS	89
10.5 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE LINEAS	90
10.6 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE DISPERSIÓN PARA LAS VIBRACIONES	92
10.7 GRÁFICAS EXTRA DE ENERO DE 2020	93
10.8 GRÁFICAS EXTRA DE FEBRERO DE 2020	97
10.9 GRÁFICAS EXTRA DE MARZO DE 2020	104
10.10 GRÁFICAS EXTRA DE ABRIL DE 2020	107
10.11 GRÁFICAS EXTRA DE MAYO DE 2020	113
10.12 GRÁFICAS EXTRA DE JUNIO DE 2020	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tres tipos de cimentaciones de la energía eólica offshore fija [9].....	12
Figura 2. Tres tipos de aerogeneradores flotantes. [10].....	13
Figura 3. Principio de osmosis [11]	13
Figura 4. Planta de generación mediante el gradiente de salinidad [12]	14
Figura 5. Planta OTEC offshore y onshore [13]	14
Figura 6. Ciclo cerrado de Rankine usando la tecnología OTEC [14].....	15
Figura 7. Generación mediante el uso de la energía potencial de las mareas [15]	15
Figura 8. Tipos de dispositivos de extracción de energía cinética de la marea [17].....	16
Figura 9. Dispositivos de conversión de energía de las olas offshore [18] y [19]	17
Figura 10. Dispositivos de conversión de energía de las olas nearshore [18]	18
Figura 11. Dispositivos de conversión de energía de las olas onshore [18].....	18
Figura 12. a) Mapa e b) infografía orientativos para la localización de Mutriku [21].....	20
Figura 13. Construcción del dique de Mutriku [24]	21
Figura 14. Funcionamiento de una planta OWC [25].....	22
Figura 15. a) Turbina Wells instalada y b) partes de la turbina Wells en la planta undimotriz de Mutriku [colección personal]	23
Figura 16. Rotor de 5 palas de las turbinas Wells de Mutriku [colección personal].....	24
Figura 17. Plano de la planta y disposición de las turbinas.....	28
Figura 18. Calendario de los días seleccionados del año 2020 para el estudio de la potencia de las turbinas	29
Figura 19. Calendario de los días seleccionados del año 2020 para el estudio de vibraciones de las turbinas	33
Figura 20. Comparación de la potencia generada de la turbina T07. a) Año 2019 b) Año 2020	35
Figura 21. Potencia generada en enero de 2020 por 4 turbinas.....	36
Figura 22. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en enero 2020.....	37
Figura 23. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en febrero 2020.	38
Figura 24. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en marzo 2020.	39
Figura 25. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en abril 2020.	39
Figura 26. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en mayo 2020.	40
Figura 27. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en junio 2020.	40
Figura 28. Generación de potencia de las turbinas T07, T08 y T11 en enero de 2020. Días 21 (a), 22 (b), 23 (c), 24 (d), 25 (e) y 26 (f).....	44
Figura 29. Generación de potencia de las turbinas T07, T08 y T11 en febrero de 2020. Días 18 (a), 19 (b), 20 (c), 21 (d), 22 (e) y 23 (f)	47
Figura 30. Generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 en marzo de 2020. Días 17 (a), 18 (b), 19 (c), 20 (d), 21 (e) y 22 (f)	51
Figura 31. Generación de potencia de las turbinas T07, T11 y T12 en abril de 2020. Días 21 (a), 22 (b), 23 (c), 24 (d), 25 (e) y 26 (f).....	55
Figura 32. Generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 en mayo de 2020. Días 26 (a), 27 (b), 28 (c), 29 (d), 30 (e) y 31 (f)	59
Figura 33. Generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 en junio de 2020. Días 23 (a), 24 (b), 25 (c), 26 (d), 27 (e) y 28 (f)	63

Figura 35. Análisis de las vibraciones del 21 de enero de 2020 en la turbina T11.	67
Figura 36. Análisis de las vibraciones del 21 de febrero de 2020 de la turbina T11.....	68
Figura 37. Análisis de las vibraciones del 19 de febrero de 2020 de la turbina T11.....	69
Figura 38. Análisis de las vibraciones del 18 de marzo de 2020 de la turbina T11.....	70
Figura 39. Análisis de las vibraciones del 19 de marzo de 2020 de la turbina T11.....	71
Figura 40. Análisis de las vibraciones del 20 de marzo de 2020 de la turbina T11.....	72
Figura 41. Análisis de las vibraciones del 21 de marzo de 2020 de la turbina T11.....	72
Figura 42. Análisis de las vibraciones del 24 de junio de 2020 de la turbinaT11.....	73
Figura 43. Vibraciones de la turbina T08: 21 enero de 2020 (a); 19 (b) y 21 (c) de febrero de 2020; 18 (d), 19 (e) y 20 (f) de marzo de 2020.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de la aleación de aluminio AW-5083.....	25
--	----

LISTA DE ACRÓNIMOS

CSV	Comma Separated Values
EVE	Ente Vasco de la Energía
IEA	International Energy Agency
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
OWC	Oscillating Water Column
REE	Red Eléctrica de España
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
WEC	Wave Energy Converter

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático afecta por igual a todos los países y supone un peligro que amenaza con destruir el planeta, provocando el aumento de los incendios forestales, el deshielo de los polos, el aumento del nivel del mar, etc. El efecto invernadero producido por las emisiones de gases de efecto invernadero (vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), entre otros) hace que la amenaza del cambio climático aumente. Cada vez más personas están concienciadas con este problema y es por ello que se está avanzando hacia una sociedad cada vez más limpia y amigable con el medioambiente, pero aun así hay mucho que avanzar respecto a la disminución de emisiones de CO₂ y a la generación de energía renovable.

El 25 de septiembre de 2015, los países líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible, la Agenda 2030. Estos 17 objetivos planteados persiguen la igualdad entre las personas, proteger el planeta y asegurar la prosperidad. Un contrato social global que pretende que sus objetivos estén cumplidos para el año 2030 [1].

Para lograr estos objetivos que pretenden proteger el planeta es necesaria una descarbonización y una transición a fuentes de energía más limpias. Es por ello que, para mantener un seguimiento de si se están reduciendo estas emisiones y proponer pautas de cómo actuar para hacerle frente a la crisis climática, existen cumbres del clima. Cumbres como por ejemplo la de Madrid 2019 [2], la cual presentaba una serie de objetivos sobre este tema en cuestión, tales como, que no se alcancen los 2 °C de subida de la temperatura del planeta, conseguir mantener el límite del calentamiento global en los 1,5 °C y lograr el compromiso de las partes para reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero un 50% en 2030 (el Acuerdo de París establecía un 45%), con un objetivo de cero emisiones para 2050.

Analizando las emisiones de CO₂ y consumo energético del 2020 vemos que la situación de alarma sanitaria que se está dando debido a la pandemia provocada por el coronavirus SARS-CoV-2 y que provoca la enfermedad denominada COVID-19, ha tenido efecto en este sector también. En diciembre de 2019 se identificará por primera vez el

virus en la ciudad de Wuhan (China) expandiéndose rápidamente por todo el mundo. En marzo de 2020 la Organización Mundial de la Salud (OMS) proclamó la situación de pandemia mundial. Los países más afectados declararon el estado de alarma instaurando confinamientos para evitar su propagación. Este confinamiento ha afectado directamente al sector energético. El cese de la actividad en algunas de las industrias y comercios ha influido en que la demanda energética disminuya. Además, la incapacidad de salir de casa durante el periodo de confinamiento domiciliario (que duró aproximadamente dos meses, desde mediados de marzo hasta finales de mayo), ha imposibilitado el uso del transporte promoviendo así una reducción también en las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄. Según datos proporcionados por la Agencia internacional de la energía (IEA por sus siglas en inglés) 2020 ha sido un buen año para las energías renovables a nivel global, ya que se ha reducido el uso de los combustibles fósiles, como el carbón (un 8% en comparación con el año 2019), el fuel (un 5% en comparación con el año 2019) y el gas natural (un 2% en comparación con el año 2019), y en cambio el uso de energía proveniente de fuentes renovables ha aumentado un 1,5%. El CO₂ emitido también se ha reducido en 2020. Se estima una disminución en las emisiones de carbono de entorno a un 4,4% [3], pero, aun así, la reducción tendría un impacto casi nulo en el cambio climático ya que supone una disminución de tan solo 0,01 °C en el calentamiento global para el 2050 [4].

En la Unión Europea durante el primer trimestre de 2020, la demanda de carbón se redujo un 20% y la proporción de energías renovables alcanzó un máximo histórico con casi un 43% de la generación [5]. Teniendo en cuenta tanto la Unión Europea como Reino Unido, las emisiones de CO₂ debido al confinamiento se redujeron unas 0,38 Gt de CO₂ lo que supuso una reducción del 7,7%. Esta disminución de emisiones no es solo debida al confinamiento de los países, sino que también se vio influida por el confinamiento de los países fronterizos como consecuencia indirecta de la imposibilidad de la libre circulación entre países [6].

A nivel nacional, y según los datos proporcionados por Red Eléctrica de España (REE), en España también se produjo una disminución del 5,6% en la demanda de energía eléctrica debida a la pandemia de COVID-19 y la producción de energía renovable alcanzó un récord histórico con un 43,6% de la generación (37,5% en 2019). La energía eólica fue la

energía renovable con más presencia en el *mix* energético español con un 21,7% de la generación total de energía, seguida de la energía hidráulica con un 11,9% y la energía solar fotovoltaica que supuso un 6,1% [7]. Respecto a las emisiones de CO₂ totales en 2020 en España, se redujeron un 13,1%, del cual el sector que más influyó en esta disminución de CO₂ fue el sector energético con un 5,4% (una generación de Mt de CO₂ de un 23,9% menos que en 2019) [2]. Como consecuencia directa del aumento de las energías renovables se dio el récord histórico de mayor producción energética libre de emisiones de CO₂ con un 66,9 % según las previsiones de REE. Todo esto se debe a que las condiciones climáticas durante el 2020 han sido muy favorables, con un muy buen año en lo que a disponibilidad de viento y radiación solar se refiere, dando lugar a un incremento de la potencia renovable instalada, que en 2020 sumó 2,706 MW nuevos de energía eólica y solar fotovoltaica [7]. Esta situación que favoreció el uso de las energías renovables sumado al confinamiento domiciliario provocado por la pandemia ralentizó la actividad económica promoviendo una disminución en la demanda eléctrica de un 5,6%. Si a todo esto se le añaden las limitaciones de movilidad sufridas que han causado un descenso en el uso del transporte da como resultado lo que ya veníamos exponiendo, que el 2020 ha sido un buen año para el medioambiente en general.

El año 2020 en particular ha estado caracterizado por el creciente uso de energías limpias a nivel nacional, pero el uso de este tipo de fuentes energéticas no es nada nuevo, y es que España lleva más de un siglo apostando por la introducción en su *mix* energético de energías renovables. La energía renovable con más historia en nuestro país es la energía hidroeléctrica. Ésta aprovecha la diferencia de energía potencial de una masa de agua dulce entre dos puntos a distintas cotas. En 1910 se levantó la primera central hidroeléctrica en España (Villa de Ves) y en los años 50 y 60 se dio un gran crecimiento en este sector, construyéndose en 1962 la central con mayor potencia de España en medio del río Duero (Aldeadávila). La energía eólica sin embargo es una energía más nueva. La primera vez que se construyó un parque eólico en nuestro país fue en 1994 (Sierra del Perdón). Esta energía aprovecha la energía cinética de las masas de aire y la convierte en electricidad mediante aerogeneradores. Respecto a la energía solar fotovoltaica, se trata de la energía que aprovecha la radiación solar que incide en paneles de células fotovoltaicas para así generar electricidad, y ya en 1984 se conectó la

primera instalación en España, pero al igual que la energía eólica tardó una década en avanzar hasta que se construyeron parques de generación [8]. Aparte de las tres energías renovables ya mencionadas y que son las más comunes, existen otros tipos de energías renovables como la energía marina.

La energía marina es una energía aun en estado de desarrollo pero que posee muy buenas perspectivas de futuro. Ésta se divide en dos grupos, la energía eólica *offshore* (que significa “fuera de la costa” en inglés) y la energía oceánica.

Por una parte, la energía eólica *offshore* se basa en la extracción de la energía cinética del viento mediante aerogeneradores, pero a diferencia de la energía eólica convencional estos aerogeneradores están situados en el mar. Los aerogeneradores pueden estar fijos en el lecho marino dando lugar a la eólica *offshore* fija (Figura 1), o por el contrario pueden estar flotando en el mar, dando así lugar a la energía eólica *offshore* flotante (Figura 2), siendo esta última más reciente y por lo tanto menos común.

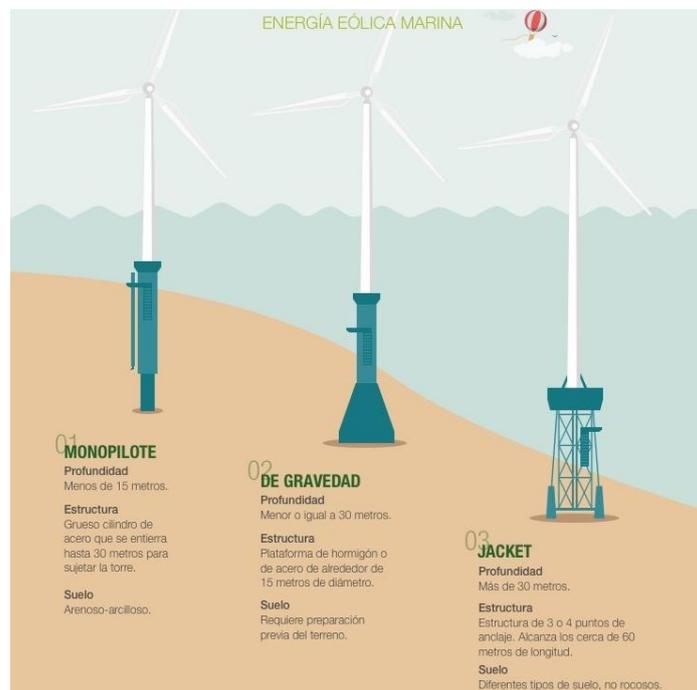


Figura 1. Tres tipos de cimentaciones de la energía eólica *offshore* fija [9]



Figura 2. Tres tipos de aerogeneradores flotantes. [10]

La principal ventaja de la energía eólica situada en el mar es que al no haber ningún tipo de obstáculo que pueda hacer que la energía cinética que lleva el viento se disperse, se aprovecha mejor la energía del viento.

Por otra parte, en cuanto a la energía oceánica, hasta la fecha se cuenta con cuatro grandes grupos dependiendo del recurso del mar que se quiera aprovechar: Uso del gradiente salino, aprovechamiento del gradiente térmico, uso de la energía de las mareas y utilización de la energía de las olas. El uso del gradiente salino consiste en aprovechar la alta salinidad del agua del mar. Las plantas diseñadas para la extracción de energía mediante el gradiente salino se sitúan en las desembocaduras de ríos, estuarios, lagunas y lagos para así sacar provecho de la diferencia de salinidad de estas masas de agua dulce con el mar. Aunque existen varios métodos en desarrollo para generar energía, en general, se basan en la ósmosis, fenómeno que se produce cuando dos sustancias de distintas concentraciones están separadas por una membrana semipermeable. De esta manera el líquido de la sustancia con baja concentración pasa a la membrana hasta alcanzar un equilibrio entre las dos sustancias (Figura 3).

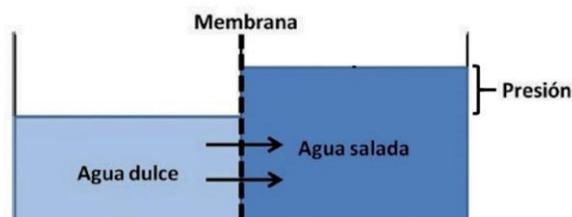


Figura 3. Principio de ósmosis [11]

Para generar energía se aprovecha la carga hidrostática que es igual a la diferencia de presiones entre las dos corrientes y mediante el uso de una turbina y un generador ésta se convierte en electricidad (Figura 4) [11].

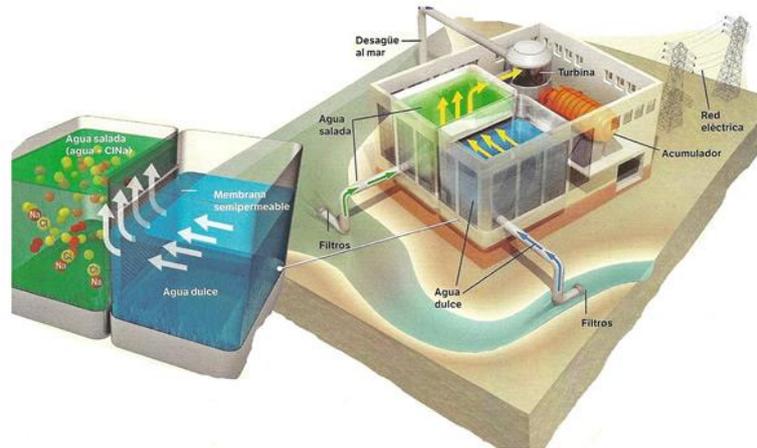


Figura 4. Planta de generación mediante el gradiente de salinidad [12]

La energía que utiliza las diferencias de temperatura del océano se llama Conversión de Energía Térmica Oceánica (OTEC por sus siglas en inglés). Aunque está en fase preliminar posee un alto potencial. El agua del mar retiene el 15% de la energía solar como energía térmica. Esta energía se concentra en la parte superior del agua del mar y disminuye al incrementar la profundidad alcanzando su mínimo en el fondo marino. La OTEC aprovecha la diferencia de temperaturas del agua para la producción de energía eléctrica (Figura 5).

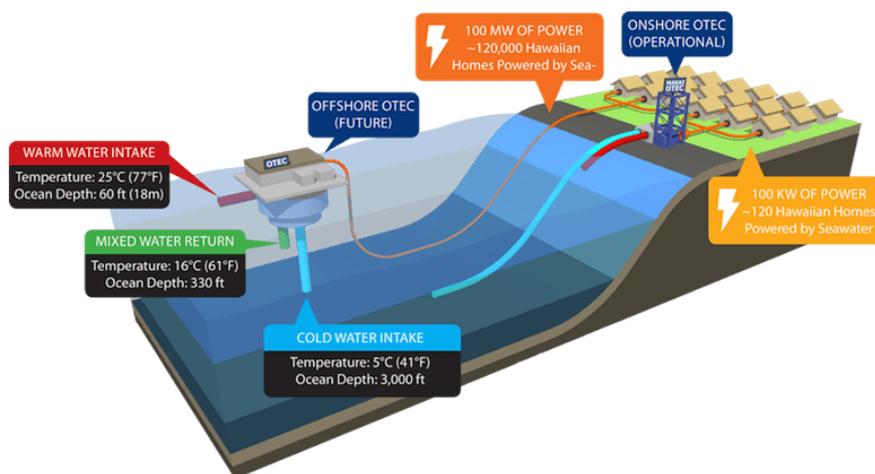


Figura 5. Planta OTEC offshore y onshore [13]

Para la generación eléctrica, la tecnología OTEC se basa en el ciclo termodinámico *Rankine* (abierto, cerrado o híbrido) [14]. El agua templada entra en la planta hasta un intercambiador de calor cediendo energía al líquido con el que trabaja la planta. Este líquido se evapora y se turbiniza para generar la electricidad y finalmente el líquido vuelve a atravesar otro intercambiador de calor, esta vez con el agua profunda más fría para así pasar a condensarse (Figura 6).

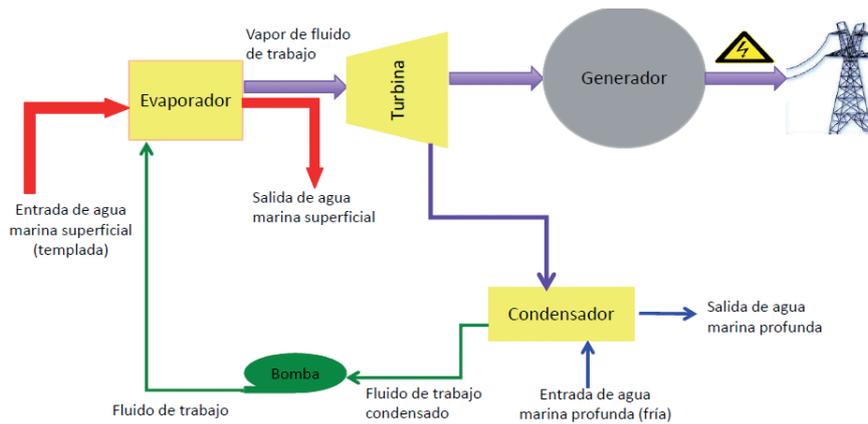


Figura 6. Ciclo cerrado de *Rankine* usando la tecnología OTEC [14]

Otro recurso utilizable del mar para la generación eléctrica son las mareas. Existen dos opciones: utilizar la energía potencial de las mareas o utilizar la energía cinética de las mareas. La energía potencial se aprovecha mediante turbinas, se almacena el agua utilizando presas cuando la marea sube y se genera energía por medio de la descarga. (Figura 7).

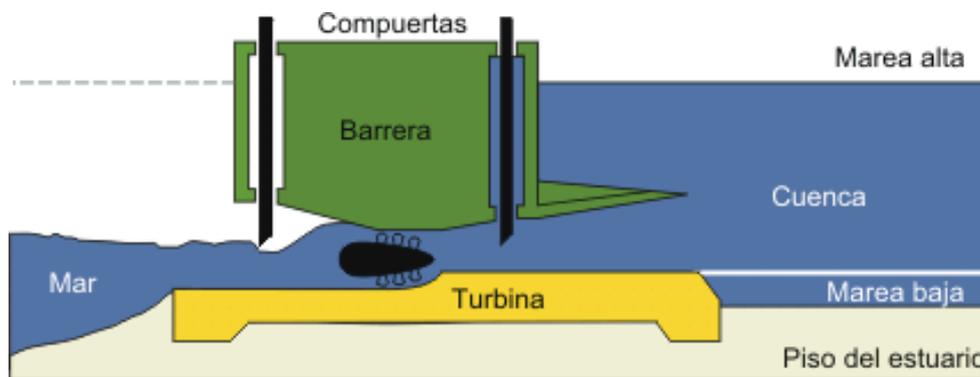


Figura 7. Generación mediante el uso de la energía potencial de las mareas [15]

Respecto al uso de la energía cinética de las mareas, los métodos para explotar este recurso son muy similares al principio de extracción de la energía eólica. Los dispositivos para la extracción de la energía cinética de las mareas son los siguientes (Figura 8) [16]:

- a) Turbinas de eje horizontal. Explotan el flujo de la marea mediante una turbina montada en un eje horizontal (Figura 8a).
- b) Turbinas de eje vertical. Mismo funcionamiento que las turbinas horizontales, excepto que estas turbinas tienen el eje vertical (Figura 8b).
- c) Turbina con ductos. Turbinas de eje horizontal dentro de un Venturi diseñado para acelerar el flujo o usar el diferencial de presión inducido en el sistema para mover una turbina de aire (Figura 8c).
- d) Tornillo de Arquímedes. Dispositivo helicoidal que extrae la energía de la corriente por el movimiento generado en la espiral que hace girar una turbina. Una variación de las turbinas de eje vertical (Figura 8d) [17].
- e) Hidro-ala oscilante. Utiliza un brazo oscilante que cabecea, este movimiento se utiliza para bombear un fluido hidráulico a través de un motor (Figura 8e).
- f) Cometa mareográfica. Una cometa atada a una turbina y fija al lecho marino, la cometa se desplaza haciendo pasar un flujo de agua a través de la turbina (Figura 8f).

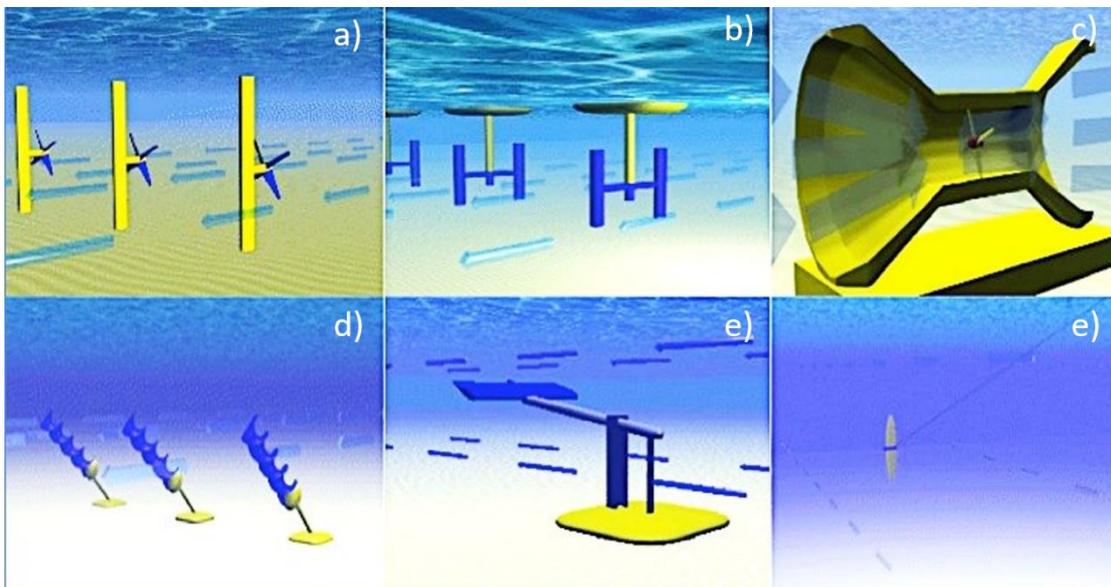
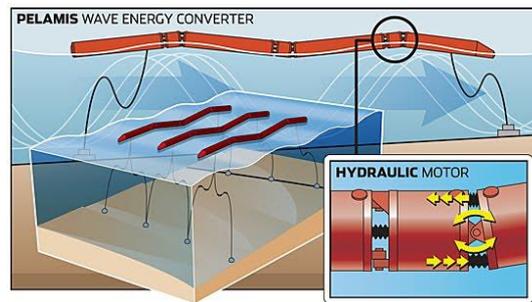


Figura 8. Tipos de dispositivos de extracción de energía cinética de la marea [17]

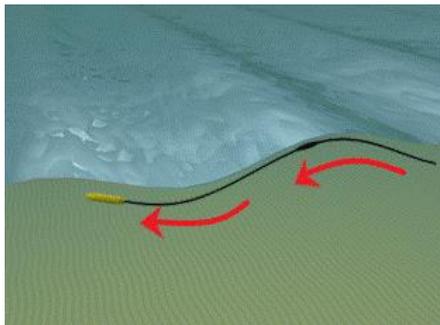
Finalmente existen diferentes métodos para la extracción de energía mediante el uso de las olas marinas. A este tipo de energía se le denomina energía undimotriz. Dependiendo de la localización distinguimos tres grupos de dispositivos de conversión de energía de las olas (WEC por sus siglas en inglés), los dispositivos lejos de la costa (*offshore*), los

dispositivos cercanos a la costa (*nearshore*) y los dispositivos en la franja costera (*onshore*) [16]. Dentro de los dispositivos *offshore* encontramos los siguientes:

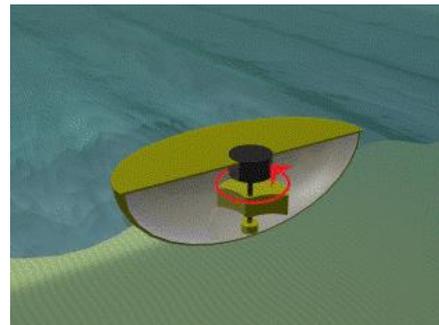
- Atenuadores: convierten la potencia de la ola entrante en movimientos oscilatorios presurizando unos pistones hidráulicos situados en el interior del dispositivo que hacen girar una turbina (Figura 9a).
- Dispositivos de bombeo, utilizan la presión inducida por la ola para generar una onda de bombeo en un tubo flexible que está en su extremo conectado a una turbina (Figura 9b).
- Convertidores de masa giratoria: utilizan el movimiento relativo de las olas para generar un movimiento de cabeceo y rotación a un cuerpo flotante que a su vez hace que una masa excéntrica situada en el cuerpo gire impulsando un generador eléctrico (Figura 9c).



a)



b)



c)

Figura 9. Dispositivos de conversión de energía de las olas *offshore* [18] y [19]

En cuanto a los dispositivos *nearshore* están compuestos por los siguientes tipos:

- Convertidores de sobretensiones de ondas oscilantes: este tipo induce un movimiento oscilatorio de una masa en dirección horizontal (Figura 10a).
- Absorbedores puntuales: aprovechan el ascenso y cabeceo del agua marina utilizando el movimiento relativo entre un cuerpo oscilante y una estructura fija (Figura 10b).
- Dispositivos de Presión Diferencial Sumergida: explotan la presión hidrodinámica. Esta presión fuerza un movimiento ascendente del dispositivo que posteriormente regresa a su posición inicial cuando el diferencial de presión se ha reducido (Figura 10c).

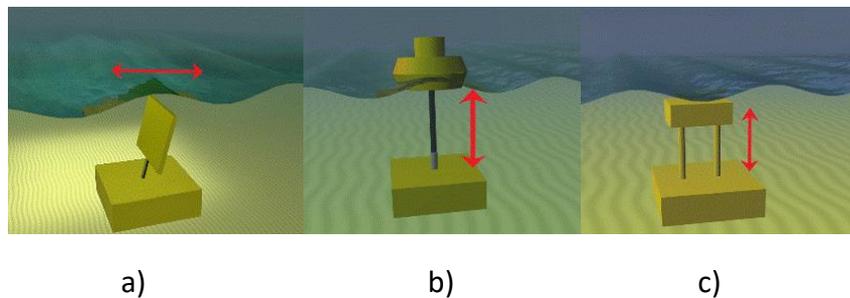


Figura 10. Dispositivos de conversión de energía de las olas *nearshore* [18]

Finalmente existen los dispositivos *onshore*. Dentro de estos dispositivos encontramos, por una parte, los dispositivos de superación u *overtopping* (Figura 11a). Estos dispositivos contienen una rampa sobre la cual las olas viajan hasta un depósito. Aprovechando la energía potencial de esta agua se produce energía eléctrica al hacerla pasar por una turbina situada en una cota más baja. Por otra parte, tenemos los dispositivos de columna de agua oscilante (OWC por sus siglas en inglés) (Figura 11b) los cuales utilizan una columna de agua que comprime una masa de aire siendo este aire el que atraviesa un grupo turbina-generador con el fin de generar energía.

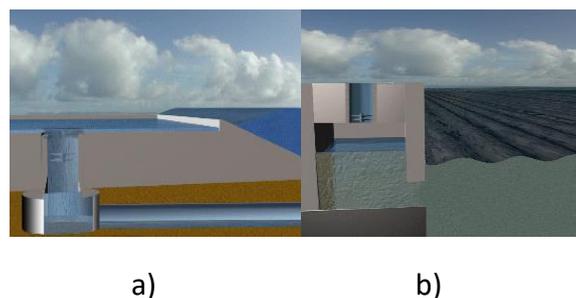


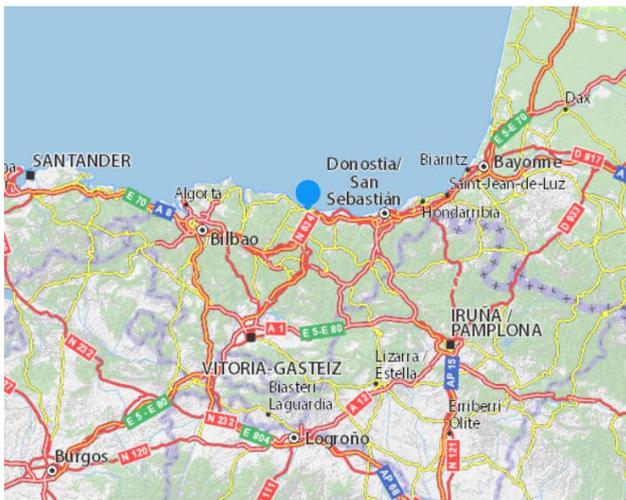
Figura 11. Dispositivos de conversión de energía de las olas *onshore* [18]

Esta última tecnología expuesta, OWC, es la tecnología utilizada en la planta undimotriz de Mutriku (Gipuzkoa) que ha estado generando energía eléctrica ininterrumpidamente desde 2011, consiguiendo en 2020 un récord histórico de producción al alcanzar una energía acumulada de 2.000.000 kWh, una cifra jamás antes obtenida en instalaciones que aprovechan la energía de las olas [20].

2. CONTEXTO

2.1 HISTORIA DEL PUERTO DE MUTRIKU

Mutriku se encuentra en la provincia de Gipuzkoa, en la Comunidad Autónoma del País Vasco al norte de la península Ibérica. Edificada sobre una pendiente ladera que desciende del monte Arno, es una localidad costera mojada por el mar Cantábrico (Figura 12).



a)



b)

Figura 12. a) Mapa e b) infografía orientativos para la localización de Mutriku [21]

Mutriku es conocida por poseer uno de los puertos más antiguos de Gipuzkoa. Sus habitantes históricamente se han dedicado a la pesca de ballenas y en la actualidad continúan con la actividad pesquera y las industrias derivadas de ella, como las conservas. Debido a la estrechez de la bocana y el fuerte oleaje del mar, el acceso al puerto de este pueblo costero era difícil, por lo que en 1877 inspirado en un proyecto del ingeniero Evaristo Churruga se realizó una remodelación mediante la cual el puerto adquirió la estructura que posee actualmente. Posteriormente en 1932 el ingeniero Ramon Iribarren desarrolló una serie de técnicas capaces de desviar las corrientes marinas a zonas menos perjudiciales, dando así solución a los problemas ocasionados por las fuertes corrientes marítimas que dañaban la estructura y dificultaban la circulación de los barcos. En 2001 se planteó un proyecto de modernización para el puerto con la intención de crear un dique que albergara un puerto deportivo, comercial

y pesquero. Finalmente, ese proyecto no llegó a materializarse y la reforma se limitó a la construcción de un dique protector. Aprovechando esta obra, el Gobierno Vasco, a través del Ente Vasco de la Energía (EVE), firmó un protocolo para implantar en él la planta undimotriz, o de aprovechamiento de las olas, de Mutriku [22].

2.2 OBRA CIVIL

La obra del dique comenzó el verano de 2006 y duró aproximadamente 32 meses. En este periodo de tiempo se construyó el dique y se hizo la inclusión de la planta undimotriz en el cuerpo del dique la cual requería de toma eléctrica y de agua, y de telecomunicaciones para poder operar. El dique es de aproximadamente 440 metros de largo diseñado en forma de “boomerang” accesible mediante un camino de unos 370 metros de largo. Tiene -2 metros de profundidad en el extremo más próximo a la costa mientras que el extremo opuesto se encuentra a una cota de -17 metros. El dique de tipo talud está formado por un núcleo principal de “todo uno” de cantera y mantos de bloques de piedra natural en distintos tamaños de 15 t, 25 t y 45 t. La cota superior del espaldón de hormigón es de 16,5 m y la anchura de la base de 10 m. Para la instalación de las columnas de aire OWC se sustituyeron los bloques de 25 t de piedra caliza del manto, por una barricada vertical de hormigón, la cual forma la estructura de la planta. Esta barricada posee una apertura inferior para que se introduzca la ola procedente del mar. La cámara de aire está conectada a la cámara de las turbinas mediante una apertura en la que se encuentran las turbinas instaladas reguladas por una válvula de seguridad de tipo mariposa [23].



Figura 13. Construcción del dique de Mutriku [24]

2.3 PLANTA UNDIMOTRIZ DE MUTRIKU

La planta undimotriz de Mutriku fue puesta en marcha en julio de 2011 y lleva generando energía ininterrumpidamente desde entonces. Utiliza la tecnología de columna de agua oscilante, OWC. Esta tecnología consiste en una estructura hueca y parcialmente sumergida, que está abierta al mar por su parte inferior. La estructura encierra una columna de aire situada encima de la columna de agua. Cuando las olas actúan sobre el dispositivo la columna de agua oscila hacia arriba y abajo, haciendo que la columna de aire se comprima y descomprima, respectivamente. A este aire en movimiento se le permite fluir hacia y desde la atmósfera a través de la turbina generando movimiento en los álabes de la misma. Este movimiento de los álabes genera una rotación en el eje del rotor produciendo una potencia mecánica, que, mediante un generador, es convertida en potencia eléctrica (Figura 14).

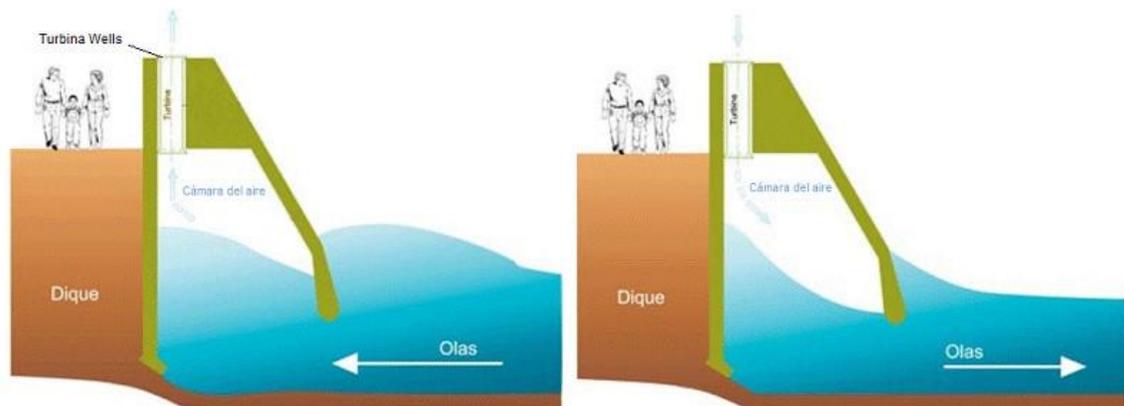


Figura 14. Funcionamiento de una planta OWC [25]

En un principio la planta fue proyectada para trabajar con 16 turbinas, pero en la actualidad solo 13 están operativas, debido a que en las cámaras de las turbinas de los extremos (1 y 16) no se alcanza la presión mínima necesaria para la generación de potencia y además la cámara número 9 se reserva como turbina de pruebas para nuevos dispositivos. Las turbinas de tipo Wells (Figura 15a) de eje vertical que la planta tiene instaladas son autorrectificadas, es decir, siempre rotan en el mismo sentido independientemente del sentido del flujo de aire en la cámara, imprescindible para un mejor aprovechamiento del movimiento del aire.



a)



b)

Figura 15. a) Turbina Wells instalada y b) partes de la turbina Wells en la planta undimotriz de Mutriku [colección personal]

Estas turbinas son relativamente pequeñas. Miden 2,83 m de altura y 1,25 m de anchura con un peso aproximado de 1.200 kg. Están compuestas por un atenuador del sonido, dos rotores de turbina, un generador de inducción, un amortiguador compuesto por una válvula de seguridad de tipo mariposa y un sistema de limpieza (Figura 15b) [23].

- El atenuador de sonido fue una adhesión posterior a la instalación de las turbinas y se añadió debido al elevado ruido que generaba el aire dentro de estas turbinas.
- Los dos rotores de la turbina de tipo Wells, uno a la entrada y otro a la salida, están compuestos por 5 palas (Figura 16). Este rodete está formado por perfiles aerodinámicos simétricos dispuestos perpendicularmente al sentido del flujo, provocando que las prestaciones sean las mismas independientemente de la dirección del flujo. Siempre giran en la misma dirección debido a que la resultante de las fuerzas de sustentación y arrastre es perpendicular a la velocidad relativa del flujo, sea cual sea su dirección [26]. Estos rotores están fabricados en una aleación de aluminio AW-5083 de grado marino con la intención de que soporten las duras condiciones del mar.



Figura 16. Rotor de 5 palas de las turbinas Wells de Mutriku [colección personal]

- El generador de inducción con una potencia nominal de 18,5 kW de potencia nominal con rotor de jaula de ardilla, trabaja en condiciones nominales a 3.000 rpm y una tensión de 450 V. Debido a la variabilidad en la velocidad de rotación condicionada por el oleaje, el generador genera corriente alterna y mediante un rectificador se pasa a corriente continua de 50Hz. Posteriormente la tensión se eleva a 13,2 kV para el vertido a red.
- El amortiguador está compuesto por una válvula de seguridad de tipo mariposa la cual es controlada automáticamente mediante un programa que calcula la presión de la cámara y la velocidad de rotación óptima. Las válvulas son eléctricamente activadas con cierre por gravedad facilitando así el cierre automático si se diese algún fallo.
- El sistema de limpieza expulsa un chorro de agua dulce automáticamente cada media hora sobre las palas del rotor con el fin de eliminar los depósitos de sal que pudieran afectar al buen funcionamiento de la turbina.

2.4 MATERIAL DE LAS TURBINAS Y CORROSIÓN

Como ya se ha mencionado los álabes son de una aleación de aluminio AW-5083. Se trata de una aleación de Aluminio-Magnesio principalmente (4 % - 4,9 %), conteniendo cromo y manganeso en menores proporciones. El prefijo AW indica que se trata de un producto forjado.

Esta serie de aleaciones (AW-5000) son conocidas por su excepcional comportamiento ante entornos agresivos y su elevada resistencia a la corrosión, lo que las hace ideales

en aplicaciones para ambientes químicos o marinos. También destacan por una excelente soldabilidad.

Gracias a estas características, la aleación AW-5083 es frecuentemente utilizada en conjuntos mecánicos soldados, instalaciones en la intemperie, industria aeronáutica y automotriz, recipientes de presión soldados no expuesto a altas temperaturas, y la industria naval, siendo esta última la más importante debido a los diversos fines a los que da soporte; cascos de barcos, puertos deportivos, plataformas petrolíferas... [27].

La aleación AW-5083 posee una densidad de 2,66 g/cm³ y una dureza Brinell de 75 HB. A inicios del 2017 el precio de este material rondaba los 4,72 €/kg. A continuación, se presenta una tabla con las propiedades físicas del material a una temperatura ambiente de 20 °C:

Tabla 1: Propiedades de la aleación de aluminio AW-5083

PROPIEDADES	VALOR
Densidad (g/cm ³)	2,66
Modulo elástico (N/mm ²)	71.000
Coefficiente de Poisson	0,33
Intervalo de temperatura de fusión (°C)	580 – 640
Coefficiente de dilatación lineal (1/10 ⁶ K)	23,8
Conductividad térmica (W/m K)	117
Resistencia eléctrica (μΩ cm)	6

Aunque es un material con buena resistencia a la corrosión, el ambiente húmedo y la constante exposición a la sal marina acaba corroyendo los álabes de las turbinas. Esta corrosión sumada a las fuertes fuerzas de oscilación que las turbinas tienen que soportar producen fatiga, y en el peor de los casos si no se le diera solución, podría conllevar una rotura de los álabes [28]. La incrustación de depósitos de sal no solo reduce la generación de potencia debido a la pérdida de aerodinamismo, sino que produce vibraciones, y en consecuencia la fatiga del material. Debido a que la sal es una substancia tanto corrosiva como abrasiva, otro de los problemas asociados a ésta es su capacidad erosiva, ya que, debido al constante choque de estos granos contra las palas, la velocidad del flujo de aire dentro de la cámara en la que viaja la sal puede dañar los

álabes. Estos granos de sal que chocan contra los álabes constantemente generan cúmulos o depósitos de esta sustancia haciendo que la turbina pierda aerodinamismo, provocando daños en el material. Con la intención de solucionar este problema fue instalado el sistema de limpieza automático de agua dulce de las turbinas. Este sistema expulsa agua dulce sobre los álabes de las turbinas automáticamente cada media hora, lo que disuelve los posibles cúmulos que se han generado, permitiendo así a la turbina aprovechar al máximo la energía cinética del aire.

A finales de febrero del 2020 el cabezal del sistema de limpieza de dos de las turbinas falló y en consecuencia, comenzó a acumularse sal en ellas. Debido al confinamiento domiciliario establecido a medidas de marzo, el problema no pudo solucionarse hasta junio del mismo año, teniendo que activar la limpieza con agua dulce de manera manual durante los meses de marzo, abril y mayo y únicamente cuando la persona encargada del mantenimiento podía.

3. OBJETIVOS

Por medio de este trabajo se analizará y cuantificará cómo afectan las pequeñas incrustaciones de sal proveniente del mar que se adhieren en los álabes de las turbinas y como repercuten los mismos tanto en la generación de potencia, como en la corrosión del material de la turbina. Se pretende también exponer el efecto de estas incrustaciones tanto a corto como a largo plazo y analizar las posibles soluciones que se podrían aplicar.

Para el estudio del efecto de las incrustaciones salinas nos valdremos de los datos obtenidos del sistema de adquisición de datos (SCADA) de la planta undimotriz de Mutriku. Debido al fallo en el sistema automático de limpieza con agua dulce al comienzo del confinamiento domiciliario provocado por la pandemia, se ha podido estudiar el efecto de esta sal incrustada, en la generación de la potencia de las turbinas afectadas, así como en las vibraciones provocadas en las mismas. Un análisis más exhaustivo de los datos muestra cuándo se daba la limpieza, cómo de efectiva era esta limpieza y cómo afectaba al funcionamiento de la turbina.

Este análisis sobre la influencia de la sal en las turbinas nos brinda la oportunidad de estudiar posibles mejoras aplicables en la central de Mutriku, para así obtener un mejor aprovechamiento del potencial energético del mar logrando una mayor generación energética, promoviendo las energías limpias, reduciendo directamente las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera y contribuyendo por lo tanto en el cumplimiento de algunos de los objetivos propuestos en la Agenda 2030. Al tratarse de una energía renovable contribuye al cumplimiento del ODS 7 “Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna” así como al ODS 13 “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” [1].

4. DATOS

Los resultados logrados en este trabajo han sido obtenidos tras el análisis de los datos provenientes del sistema de adquisición de datos instalado en la planta undimotriz de Mutriku.

Las 16 turbinas de la planta de Mutriku están dispuestas a lo largo del dique tal y como se muestra en el plano de la figura 17 y a partir de ahora se utilizará la nomenclatura del plano para referirse a las turbinas. Las turbinas están congregadas en pequeños grupos de 4 turbinas. Cada turbina posee una serie de sensores que obtienen datos de 115 parámetros, y en el caso de la T02 treinta y cinco parámetros adicionales ya que cuenta con un inversor regenerativo. Estas tomas de datos se dan cada 0,5 segundos generando un total al año de aproximadamente 90 GB de datos. Para el trabajo que se presenta se utilizaron únicamente los datos de potencia, vibraciones y velocidad de rotación de las turbinas.

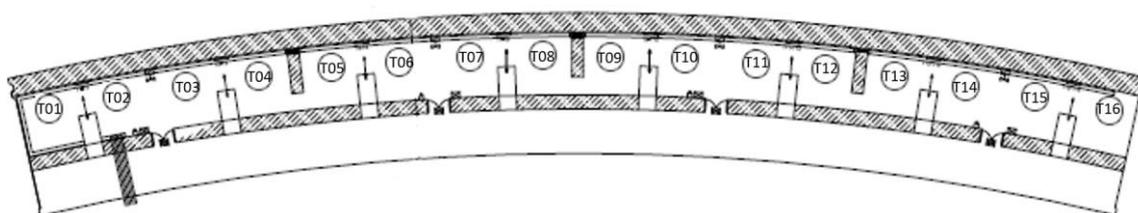


Figura 17. Plano de la planta y disposición de las turbinas

El fallo relativo al sistema de limpieza automático de agua dulce ya mencionado, ocurrió en el módulo de las turbinas T11 y T12, comenzando a acumularse sal en dichas turbinas y reduciendo así la potencia generada por estas dos turbinas. A partir de ese momento, 28 de febrero de 2020, y hasta el 4 de junio de 2020, el chorro de agua dulce tuvo que ser activado manualmente para que la limpieza comenzase. Como la limpieza de las turbinas durante el confinamiento domiciliario dependió de la activación manual, la frecuencia de la misma fue menor que cuando era activada cada 30 minutos automáticamente. Por ello, se han podido obtener datos de las turbinas T11 y T12 donde se aprecia el efecto de la acumulación de sal en el funcionamiento de las mismas, así como su recuperación tras la activación manual de la limpieza con agua dulce.

Las turbinas que más potencia generan debido a su localización en el dique son las turbinas ubicadas en las posiciones comprendidas entre la T07 y la T12. Las turbinas afectadas por el problema de la limpieza, T11 y T12, se encuentran dentro de este grupo de turbinas de alta generación, por lo que, para realizar una comparación razonable entre turbinas se ha optado por comparar el comportamiento de las mismas con la turbina T07 ya que al estar muy próximas al módulo de las turbinas afectadas, T11 y T12, se esperaba una potencia similar y comparable.

Para el análisis de los datos se ha utilizado el entorno de programación R y su herramienta *RStudio*. Se eligió este programa ya que R es un *software* matemático orientado al proceso de grandes cantidades de datos y posee un sistema de manejo y almacenamiento de datos eficiente que fue muy útil dada la gran cantidad de datos que había que procesar.

El intervalo temporal objeto de estudio son seis meses, desde enero de 2020 hasta junio de 2020 evaluando 5 días de cada mes (Figura 18). Este intervalo de seis meses ha sido seleccionado para obtener información tanto de la situación previa al problema relativo a la limpieza con agua dulce, analizándose para ello los meses de enero y febrero de 2020 como para observar lo que sucedió durante el periodo en el que el sistema de limpieza automático estuvo estropeado durante los meses de marzo, abril y mayo de 2020. Finalmente, se analizó lo que sucedió en el mes de junio, una vez el problema fue solucionado. Con esta premisa en mente, primero se procedió a realizar la evaluación y posterior limpieza o preprocesado de los datos.

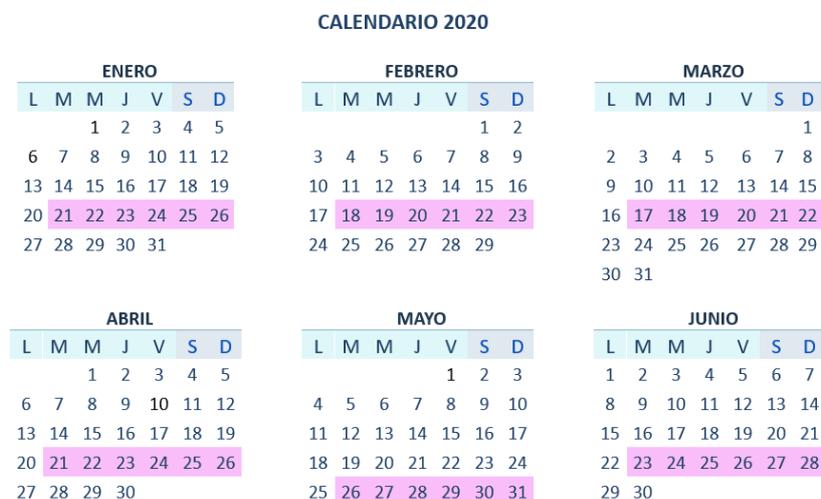


Figura 18. Calendario de los días seleccionados del año 2020 para el estudio de la potencia de las turbinas

Los datos proporcionados son archivos de tipo **.csv** (Comma Separated Values). Este tipo de archivos sirven para manejar una gran cantidad de datos en formato tabla, sin que ello conlleve un sobrecoste computacional. El programa R identifica este tipo de archivos y forma una tabla con los datos. Como columnas de la tabla se encuentran los siguientes parámetros obtenidos de las lecturas de los sensores colocados en las turbinas:

- Date: Fecha del registro.
- Time: Hora de la toma de la medida.
- ActiveCurrent_A: Medida de la corriente activa [A].
- Automatic: Con una escala del 0 al 10 que indica el estado actual de la turbina siendo el 10 el estado de generación.
- AvPowe1min_W: Potencia media generada en 1 minuto [W].
- AvPower5min_W: Potencia media generada en 5 minutos [W].
- DamperActualPosition_Deg: Grado de apertura de la válvula [°].
- DriveHealthy: Con una escala del 0 al 1 indica si la turbina sufre algún desperfecto siendo 1 en perfecto estado y 0 averiada.
- Motor_rpm: Velocidad de rotación de la turbina [rpm].
- OutputVoltage_V: Voltaje de la electricidad generada [V].
- OutputFrequency_Hz: Frecuencia de la electricidad generada [Hz].
- Power_kW: Potencia generada o consumida por la turbina [kW].
- Pressure_Pa: Presión instantánea en la cámara de aire [Pa].
- ReactiveCurrent_A: Medida de la corriente reactiva [A].
- RMSPressure_Pa: Valor eficaz de la presión en la cámara de aire [Pa].
- Vibration_mmeps: Vibraciones generadas en la turbina [mmeps].
- WFlow1_Pa: Presión de aire a la entrada de la turbina [Pa].
- WFlow2_Pa: Presión de aire a la salida de la turbina [Pa].
- WStaticPressure_Pa: Presion estatica de la cámara [Pa].

Como la mayoría de estos parámetros no eran de utilidad para el análisis que se quería realizar se redujo la gran cantidad de datos excluyéndolos, al igual que las filas de datos en los que no se tenían lecturas del sensor, es decir, valores faltantes o NA.

Para limpiar o preprocesar los datos de una manera más efectiva, se hicieron carpetas mensuales que contenían los archivos .csv de cada una de las turbinas que se iban a analizar. Una vez hecho esto, se combinaron todos los archivos relativos a un mes de funcionamiento de una turbina en un solo archivo, mediante la función “rbind”. Con este único archivo se empezó a tratar los datos.

1. Primero se hizo una limpieza de las columnas de NA puras, para eliminar así aquellas columnas sin datos, mediante la librería “janitor” y el comando “remove_empty”.
2. Los datos de calidad que serían útiles son los que tienen el parámetro *Automatic* igual a 10 que indicaría que la turbina está en funcionamiento normal; y cuando el parámetro *DriveHealthy* fuese igual a 1, ya que indica que la turbina está en perfectas condiciones.
3. Se eliminaron las potencias que son positivas ya que solo nos interesaba obtener información de cuando la turbinas estaba generando potencia. Una vez hecha esta limpieza las potencias negativas se multiplicaron por -1 para así convertirlas en valores positivos facilitando así su representación gráfica.
4. Se eliminaron las fechas duplicadas mediante la librería “dplyr” y el comando “distinct”.
5. Se suprimieron mediante la función “delete.na” las posibles filas que contuviesen datos NA.
6. Se eliminaron las columnas innecesarias para nuestra investigación introduciendo en las columnas que se querían eliminar valores NA y posteriormente usando el comando “remove_empty”.

Una vez realizado el preprocesado de los datos se procedió a su análisis. El análisis de la potencia generada por las turbinas se realizó de dos maneras, primero mediante una comparativa más general de la potencia generada por las turbinas cada mes mediante diagramas de cajas y bigotes; y para un estudio más exhaustivo del efecto de la incrustación de la sal marina en los álabes y ver el efecto de la limpieza, se hicieron gráficas de líneas de los 5 días seleccionados en cada mes (Figura 18). El análisis de los datos concluyó con un estudio de las vibraciones detectadas en las turbinas para el cual

se obtuvieron diagramas de dispersión, o nube de puntos, con las vibraciones y las velocidades de rotación como variables.

Para los diagramas de cajas y bigotes se utilizaron todos los datos disponibles de potencia sin hacer ninguna media. Debido a que R no puede unir en la misma tabla datos con distintas longitudes se utilizó el comando “max” para meter en una variable “n” el valor de la longitud mayor dentro de los datos de las turbinas que se querían graficar. Una vez obtenida esa longitud se introdujeron en las variables Tx (T08, T09, T10...) las columnas de la potencia de cada una de las turbinas y se les impuso la longitud de la variable “n” previamente obtenida. En caso de no alcanzar esa longitud tan solo se introducían filas de valores NA que no afectaban al gráfico. Una vez hecho esto se combinaron todas en una gran tabla mediante el comando “cbind” que une las variables en forma de columnas. Finalmente, con el comando “boxplot” se graficaron las potencias de las turbinas seleccionadas.

Para las gráficas de líneas, primero se introdujeron los archivos a analizar de cada turbina ese mes en una variable nombrada Tx (T08, T09...) para un uso más cómodo. Esta vez se requirió hacer una media cada 30 minutos, ya que, debido al elevado volumen de datos en la gráfica no se apreciaban las líneas correctamente. Para hacer la media de los datos se unieron las columnas fecha y tiempo en una misma columna, utilizando el comando “paste” y mediante la función “as.POSIXct” se le dio el formato requerido. A continuación, con la función “cut” y utilizando “breaks” de 30 minutos se hicieron las medias. Utilizando el comando “reduce” y “merge” se juntaron todas las variables de las medias de la potencia que habíamos generado en una sola tabla. Estos comandos hacen que se unan dependiendo de la columna que tiene en común; en nuestro caso se unen teniendo en cuenta la columna de la fecha y el tiempo. Para representar las gráficas de líneas se hizo uso de las librerías “dplyr” y “plotly”. Para seleccionar solo un día se utilizó el comando “which” seguido del comando “grepl” y se le introdujo el día que se quería seleccionar y el nombre de la columna en el que se encontraba. Finalmente, del archivo general se extrajeron las filas del día seleccionado previamente y tras cambiar los nombres de las columnas para una mejor visualización a la hora de graficar, seleccionar los ejes, sus máximos y mínimos, los colores y formato de las líneas, títulos y demás editables se graficó usando el comando “plot_ly”.

Para el estudio de las vibraciones se seleccionó algún día (Figura 19) dentro del periodo de días analizados previamente (Figura 18), tratando de que fuesen lo más variados posibles en cuanto a generación de potencia.



Figura 19. Calendario de los días seleccionados del año 2020 para el estudio de vibraciones de las turbinas

Se utilizaron los datos previamente preprocesados para aislar en un nuevo *dataframe* las columnas correspondientes a la fecha, hora, vibraciones y velocidad de rotación. Posteriormente, mediante la función “filter” se extrajo el día elegido. Tras la selección de los límites de los ejes, los nombres, títulos y características estéticas, se graficó mediante un gráfico de dispersión.

En los anexos 10.2-10.6 existe disponible información más exhaustiva sobre los comandos de programación y el código R utilizado en cada caso.

5. RESULTADOS

En este apartado se mostrarán y analizarán los resultados obtenidos. Se empezará haciendo un análisis de la potencia generada, comparando las turbinas T07 y T11 puesto que ambas son turbinas con una localización similar en el dique y por lo tanto su generación de potencia se asemeja lo suficiente para compararlas. La turbina T07 se utilizará como patrón o referencia y la T11 se analizará por ser aquella que sufre el fallo en el sistema de limpieza de agua dulce durante los meses de marzo, abril y mayo. La turbina T12 también sufre el mismo fallo, pero al no contar con suficiente cantidad de datos no siempre ha sido posible su representación gráfica. Posteriormente, se analizarán los días seleccionados con la intención de representar gráficamente la influencia de la limpieza manual de los depósitos de sal en la generación de potencia. Para finalizar se analizará la influencia en las vibraciones generadas debidas a estos depósitos de sal acumulados en los álabes de las turbinas.

5.1 COMPARATIVA GENERAL RESPECTO AL AÑO 2019

Haciendo uso de los diagramas de cajas y bigotes se va a representar la potencia generada en la planta undimotriz de Mutriku. Los gráficos de tipo caja y bigotes consisten en un rectángulo atravesados por una línea horizontal que representa la mediana. La base de este rectángulo representa el primer cuartil de los datos (datos que superan al 25% de los valores de la distribución) y el extremo superior de la caja representa el tercer cuartil (datos que superan al 75% de los valores de la distribución). De la caja, salen dos líneas, “los bigotes”, alineadas con la caja que representan los valores mínimo y máximo que toma la muestra. Se representan también los valores atípicos como puntos aislados en línea con los bigotes.

A continuación, se hará una comparación de la potencia generada ente el año 2019 (Figura 20a)) y la potencia generada el año 2020 (Figura 20b)), con la intención de mostrar si este año 2020 ha sido similar al año anterior. Para ello se ha graficado la potencia de la turbina T07 a lo largo de 7 meses y se ha comparado con los resultados obtenidos del año 2019 [24]. Se ha seleccionado esta turbina porque no sufrió ningún tipo de problema durante todo el año 2020.

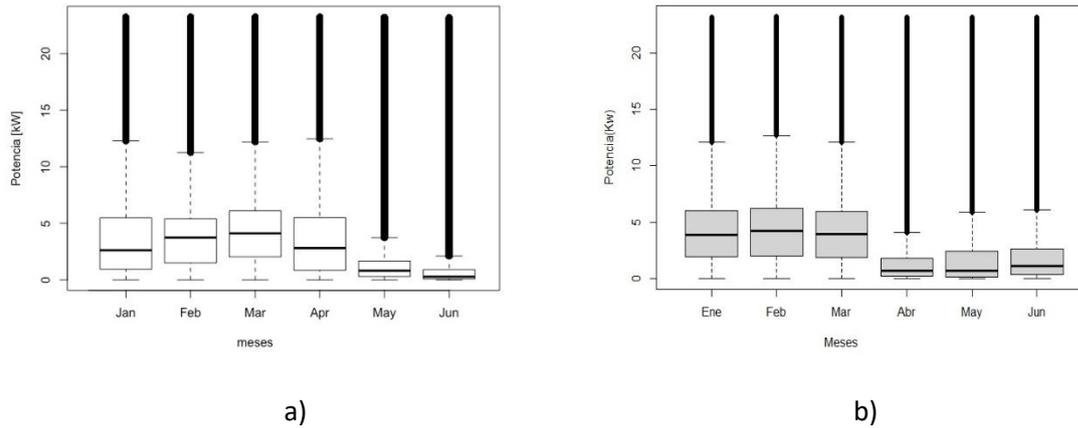


Figura 20. Comparación de la potencia generada de la turbina T07. a) Año 2019 b) Año 2020

Se ve en la gráfica de la figura 20b que el año 2020 ha sido algo mejor que el año 2019 (Figura 20a)) en lo que a generación de potencia se refiere. En el año 2020 ha habido una generación bastante estable en los meses de invierno (enero, febrero y marzo) siendo ligeramente superior a la del año 2019. Para ser más exactos en enero del 2019 la mediana estaba en 2,24 kW con un máximo de 12,3 kW mientras que la mediana de enero de 2020 está sobre los 3,9 kW con un máximo de 12,16 kW. En febrero se tiene una mediana de 3,75 kW con un máximo de 11,25 kW en 2019 y una mediana de 4,24 kW y un máximo de 12,71 kW en 2020. Finalmente, en marzo de 2019 la mediana estaría sobre los 4,11 kW y el máximo sobre los 12,71 kW, mientras que en 2020 se tiene una mediana de 3,96 kW y un máximo de 12,16 kW.

Es en abril en cambio cuando vemos la mayor diferencia entre ambas situaciones, siendo el mes de abril de 2020 un año pobre en generación con una mediana de 0,7 kW y un máximo de 4,11 kW, mientras que en 2019 se posicionaba entre los mejores meses con una mediana de 2,81 kW y un máximo de 12,44 kW. Los últimos dos meses de primavera (mayo y junio) en cambio, vuelven a dar mejores valores en 2020 que en 2019, teniendo en mayo de 2020 una mediana de 0,73 kW con un máximo de 5,89 kW en comparación con la mediana de 0,83 kW y el máximo de 3,75 kW de 2019; y en junio de 2020 una mediana de 1,09 kW con un máximo de 6,14 kW cuando en 2019 la mediana apenas alcanzó los 0,26 kW y el máximo fue de 2,14 kW.

El objetivo principal de esta breve comparación con una turbina sin problemas aparentes de cúmulos de sal (T07) era el de expresar que, aun con el confinamiento domiciliario, en general el año de nuestro estudio, el año 2020, ha sido un año similar al

anterior (año 2019) en cuanto a generación de potencia, por lo que las pérdidas de potencia en las turbinas analizadas (T11 y T12) a priori, podría decirse que se debe al posible mal funcionamiento de las mismas debido a las acumulaciones de sal.

5.2 GENERACIÓN DE POTENCIA EN LAS TURBINAS DE ESTUDIO

Tras el preprocesado de los datos se trató de representar en el mes de enero de 2020 la potencia generada por todas las turbinas próximas a la turbina de estudio T11. El mes seleccionado fue enero de 2020 ya que durante el mismo no hubo ningún fallo asociado al sistema de limpieza de agua dulce. Al final solo 4 turbinas pudieron ser graficadas ya que la T09 no estaba en funcionamiento y las turbinas T12 y T13 no contaban con la cantidad de datos necesarios para poder graficarlas.

Por lo tanto, se graficaron las turbinas T07, T08, T10 y T11 (Figura 21).

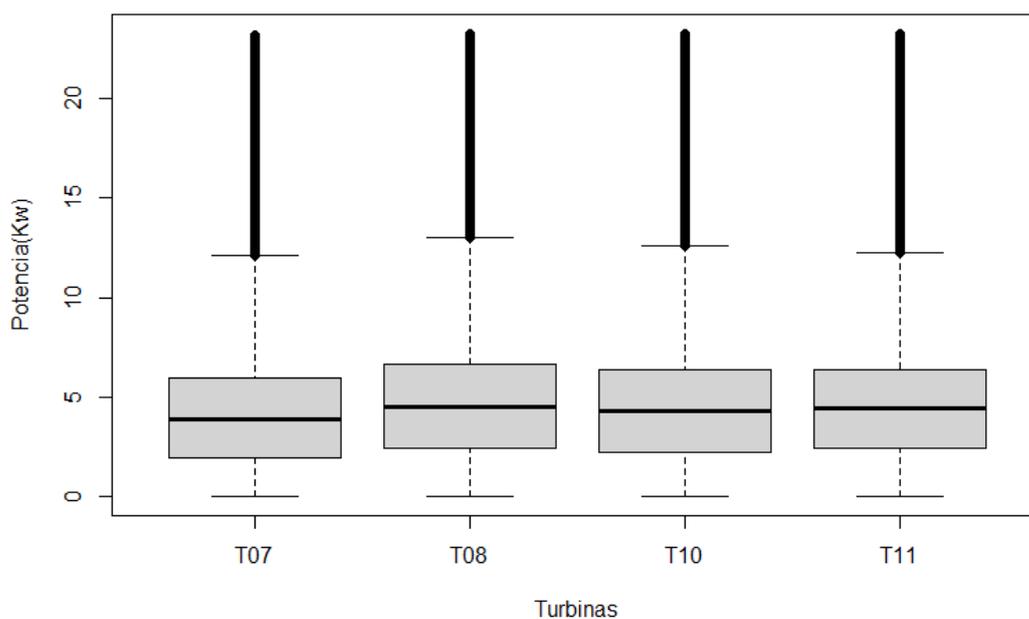


Figura 21. Potencia generada en enero de 2020 por 4 turbinas.

Para el análisis posterior se centró la investigación en la comparación de solo dos turbinas. La primera descartada fue la turbina T10 ya que tras el problema asociado al sistema de limpieza de agua dulce (finales de febrero de 2020) ésta se deshabilitó y por lo tanto no hay datos en el periodo de análisis. La potencia generada de la turbina T08 en el mes de junio disminuyó mucho debido a un problema de desgaste en la tapa del rodamiento, y es por ello que se decidió no utilizar dicha turbina para la comparación y

analizarla con detenimiento posteriormente. Los resultados obtenidos se expondrán con más detalle más adelante. La turbina restante por lo tanto fue la T07 que parecía generar una potencia similar a la T11 y dada su gran cantidad de datos durante todos los meses del año 2020 se decidió trabajar con esta turbina como referencia para la comparación.

Para analizar las turbinas T07 y T11 tenemos que tener en cuenta un par de aspectos. Primero, el periodo en el que la turbina T11 estuvo funcionando con el sistema de limpieza manual fue desde el 28 de febrero de 2020 hasta el 4 de junio de 2020, seleccionando ese periodo de tiempo para el análisis de las posibles acumulaciones de sal. El segundo aspecto a tener en cuenta sería que al tratarse de una comparación entre turbinas distintas no serán completamente iguales respecto a la generación de potencia, ya que, como se ha mencionado con anterioridad, aunque las turbinas tienen una localización y generación similar, no es exactamente la misma.

Teniendo estos dos aspectos en mente se va a realizar a continuación una comparativa de las turbinas T07 y T11 a lo largo de los 6 primeros meses del año 2020.

En primer lugar, se expondrá la comparativa para los meses de enero y febrero de 2020, donde el sistema de limpieza de agua dulce aun funcionaba de manera automática.

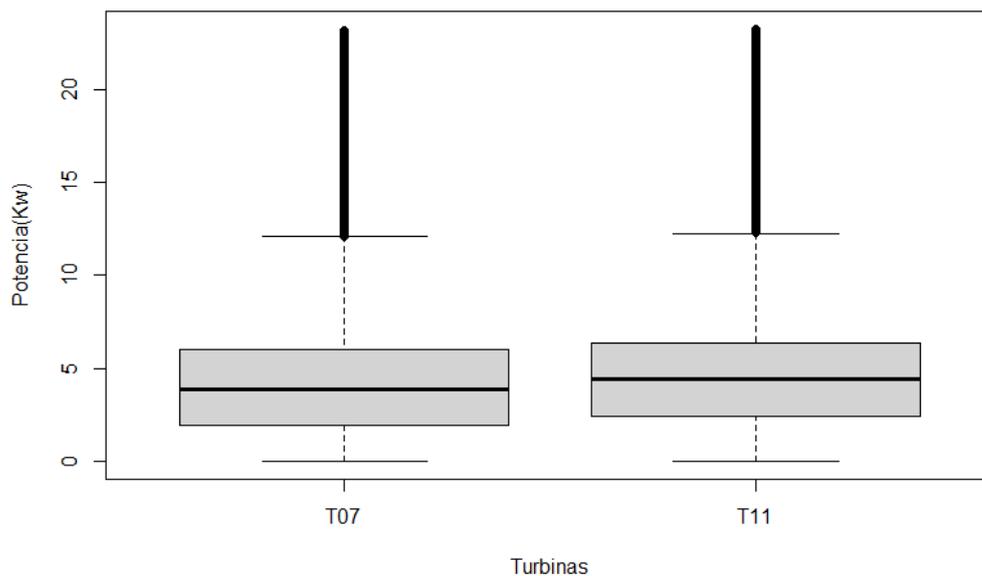


Figura 22. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en enero 2020.

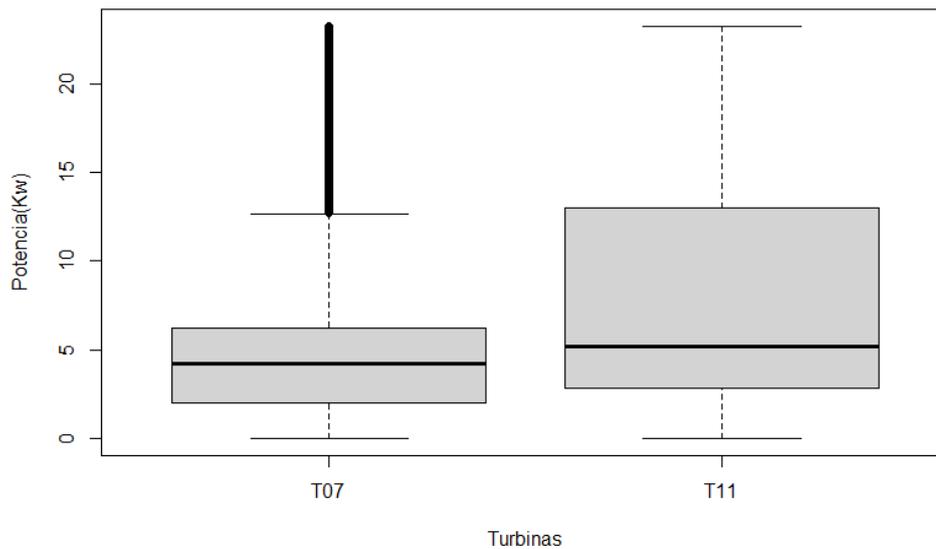


Figura 23. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en febrero 2020.

La generación de potencia en enero (Figura 22) y febrero (Figura 23) de 2020 no presenta datos con los que se pueda detectar algún tipo de incidente en las turbinas. El problema relacionado con el sistema de limpieza de agua dulce no se dio hasta el 28 de febrero de 2020 por lo que no parece haber nada anómalo en la potencia generada en la turbina T11.

A comienzos de marzo de 2020 la turbina T11 presenta una disminución en la potencia genera como muestra la siguiente gráfica (Figura 24). Esta disminución en la potencia parece estar asociada a la acumulación de depósitos de sal originados por la falta de un sistema de limpieza de agua dulce automatizado. Antes del fallo en el sistema de limpieza ésta se daba automáticamente cada 30 minutos mientras que en este momento la limpieza pasó a ser manual y por lo tanto con menos frecuencia, además del agravante que supuso el confinamiento, ya que impidió su arreglo y dificultó el acceso a la planta de manera regular.

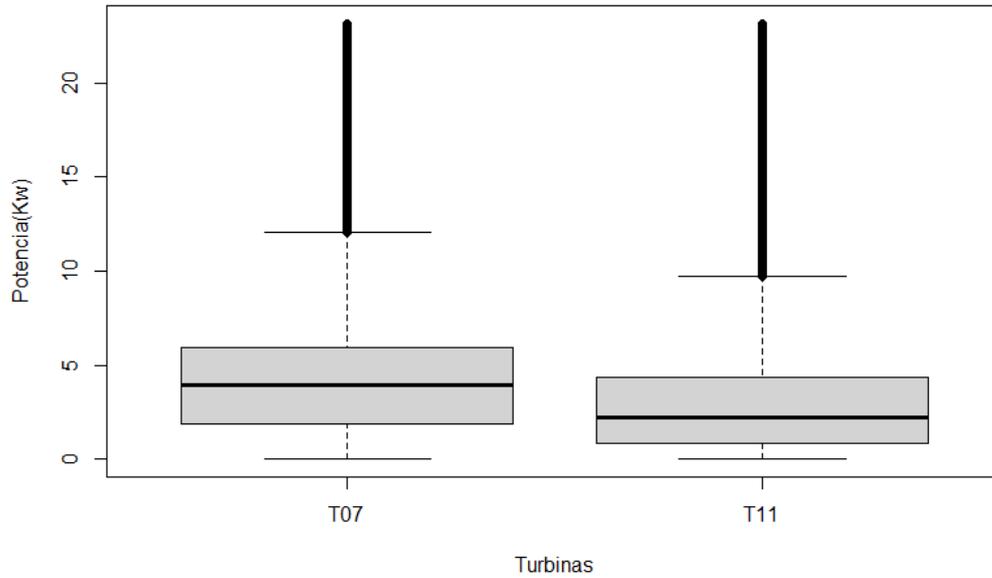


Figura 24. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en marzo 2020.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el mes de abril de 2020. Según la figura 20b, durante los meses de primavera (abril, mayo y junio) de 2020 en general, hubo una menor generación de potencia que en los meses de invierno (enero, febrero y marzo) de 2020.

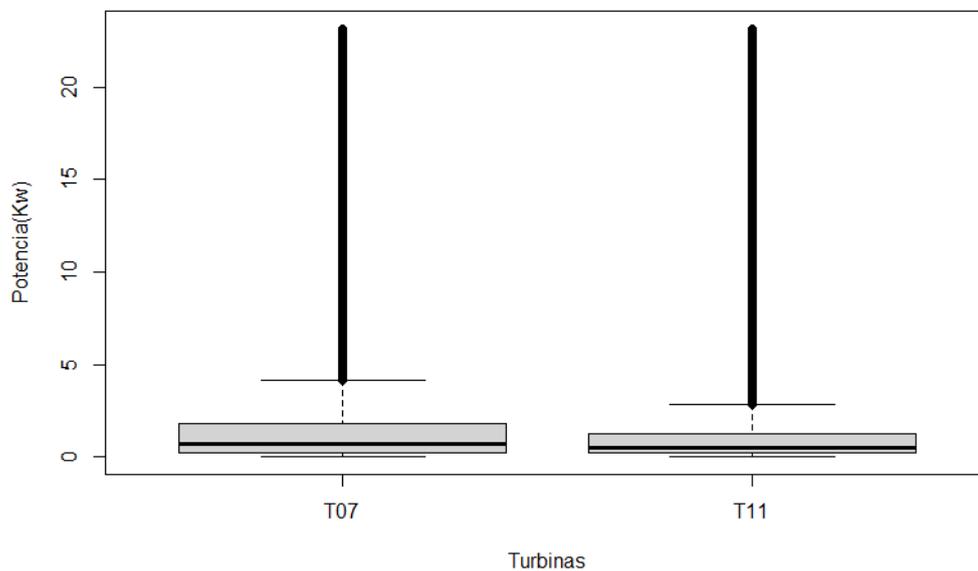


Figura 25. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en abril 2020.

Durante el mes de abril de 2020 dicha generación de potencia fue mínima, y, por lo tanto, a pesar del fallo en el sistema de limpieza de agua dulce, las diferencias en la turbina T11 con respecto a la T07 son difíciles de apreciar, siendo la generación media de la turbina T07 de 1,6 kW y la de la turbina T11 de 1,1 kW. (Figura 25).

Durante el mes mayo de 2020, en cambio, la producción de potencia es un poco mayor que en abril y, por lo tanto, la diferencia entre las turbinas T07 y T11 se aprecia un poco más (Figura 26).

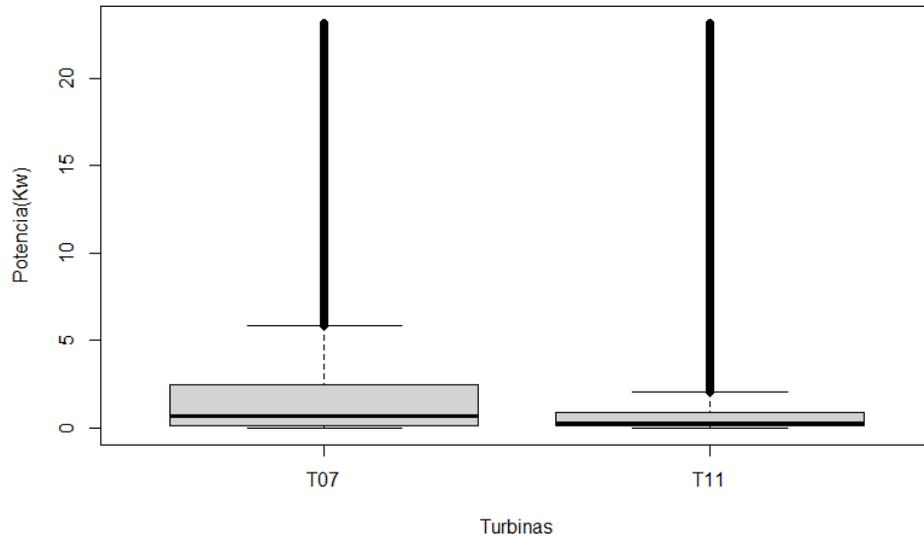


Figura 26. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en mayo 2020.

Finalmente, el 4 de junio de 2020 se solventó el problema relacionado con el fallo en el sistema de limpieza de agua dulce y por lo tanto la generación de potencia de la turbina T11 aumentó apreciándose claramente en la gráfica siguiente que ésta incluso supera la generación de la turbina T07, con una generación media de la potencia de la turbina T11 de 2,4 kW en comparación con los 2,14 kW de la turbina T07 (Figura 27).

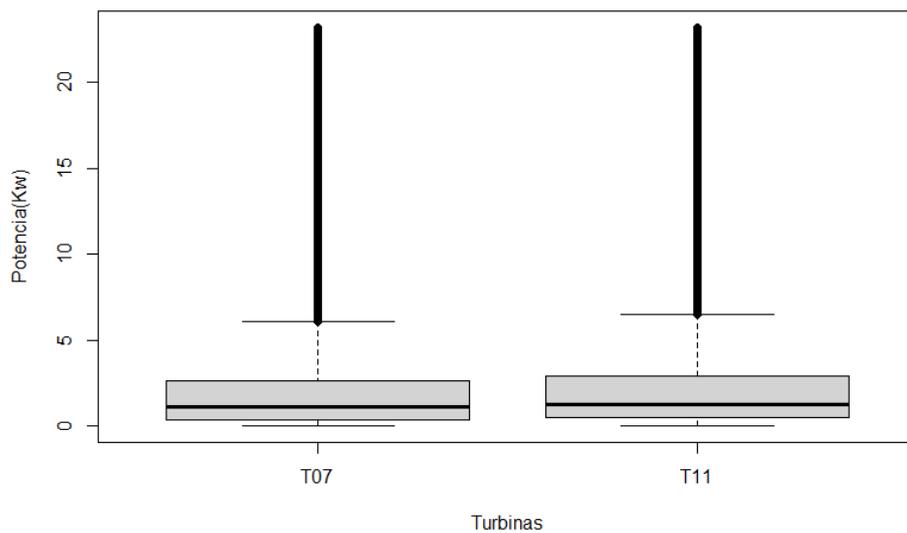


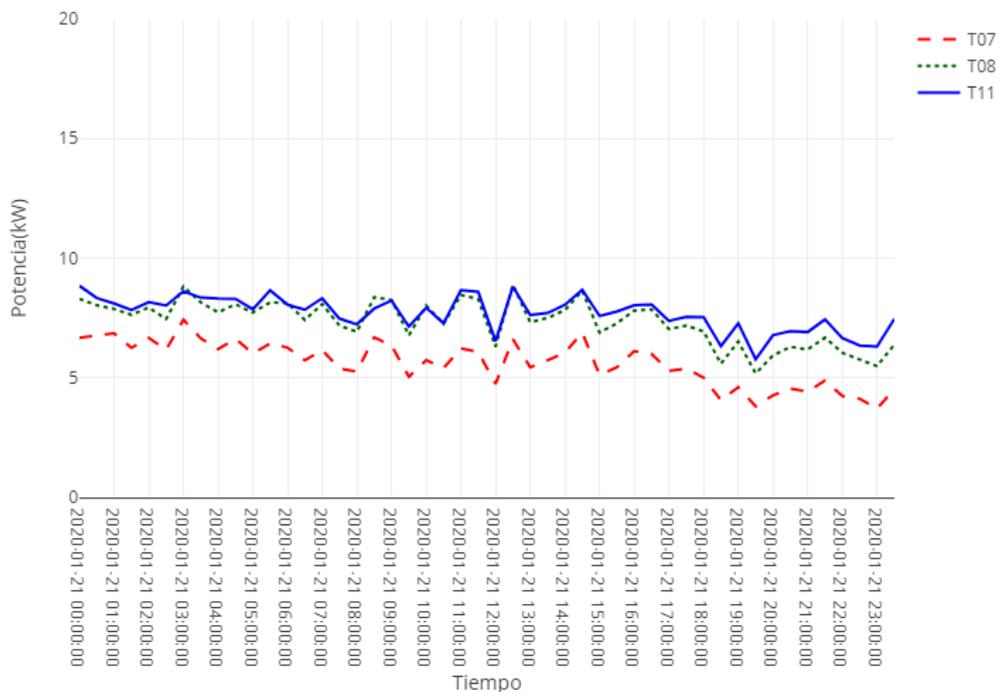
Figura 27. Generación de potencia de las turbinas T07 y T11 en junio 2020.

Por lo tanto, tras este análisis general de los seis primeros meses del año 2020 podemos asegurar que la falta de regularidad en la limpieza con agua dulce afecta negativamente al funcionamiento de las turbinas. Para un análisis más específico se presentarán ahora los resultados de una selección de 5 días de cada mes (como ya se ha indicado en la Figura 18) con el fin de profundizar en el análisis del efecto de la limpieza con agua dulce.

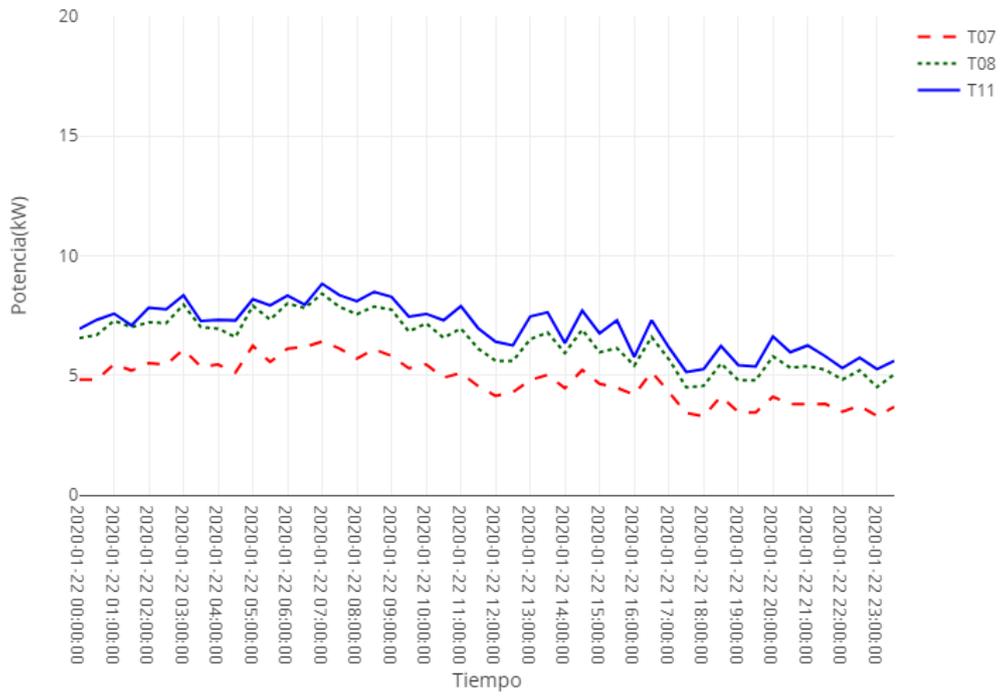
5.3 EFECTO DE LA FALTA DE LIMPIEZA REGULAR CON AGUA DULCE EN LA GENERACIÓN DE POTENCIA DE LAS TURBINAS EN DÍAS CONCRETOS

A continuación, se expondrán las gráficas creadas a partir de los datos de las turbinas T07, T08, T11 y T12 siempre que sea posible graficarlas ya que, en ocasiones debido a la falta de datos algunas de estas turbinas no aparecerán reflejadas en el gráfico. Para la mejor visualización de los datos, las gráficas de este apartado se han realizado con medias cada 30 minutos.

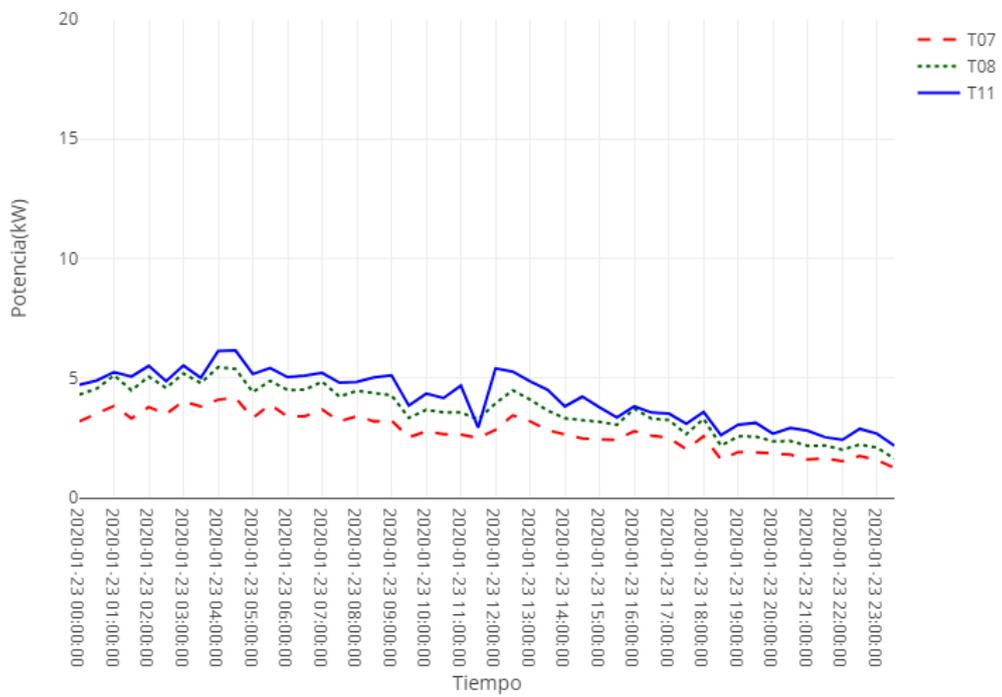
Para comenzar se expondrán las gráficas de los meses de enero de los días 21-26 (Figuras 28 a)-f)). Tanto el mes de enero como el mes de febrero de 2020 se podrían considerar los meses de control ya que en estas fechas las turbinas funcionaban sin problema alguno relacionado con el sistema de limpieza de agua dulce.



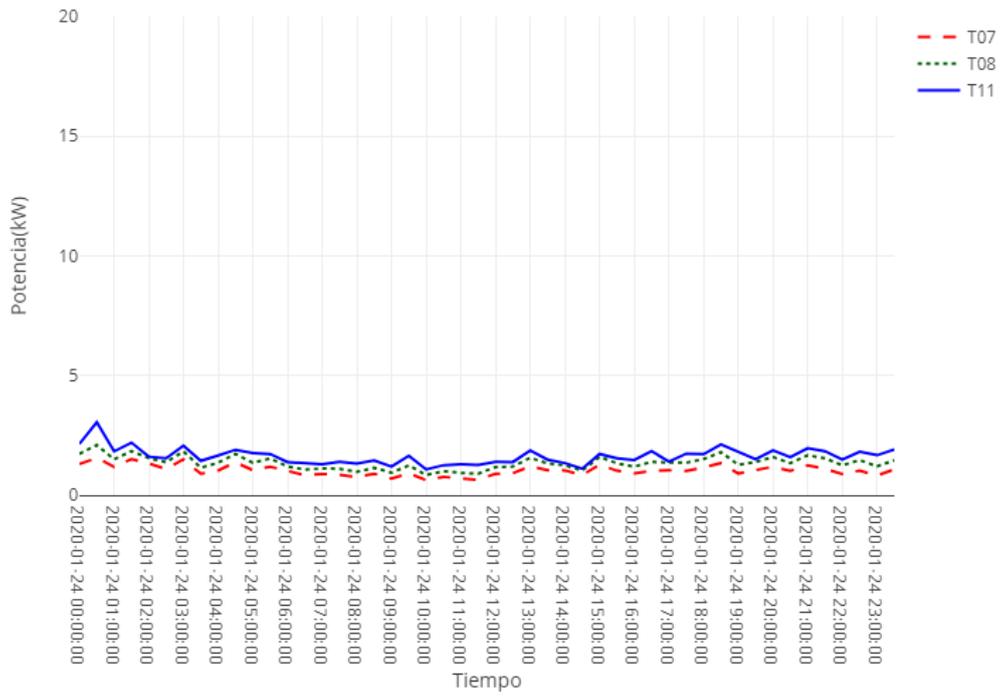
a)



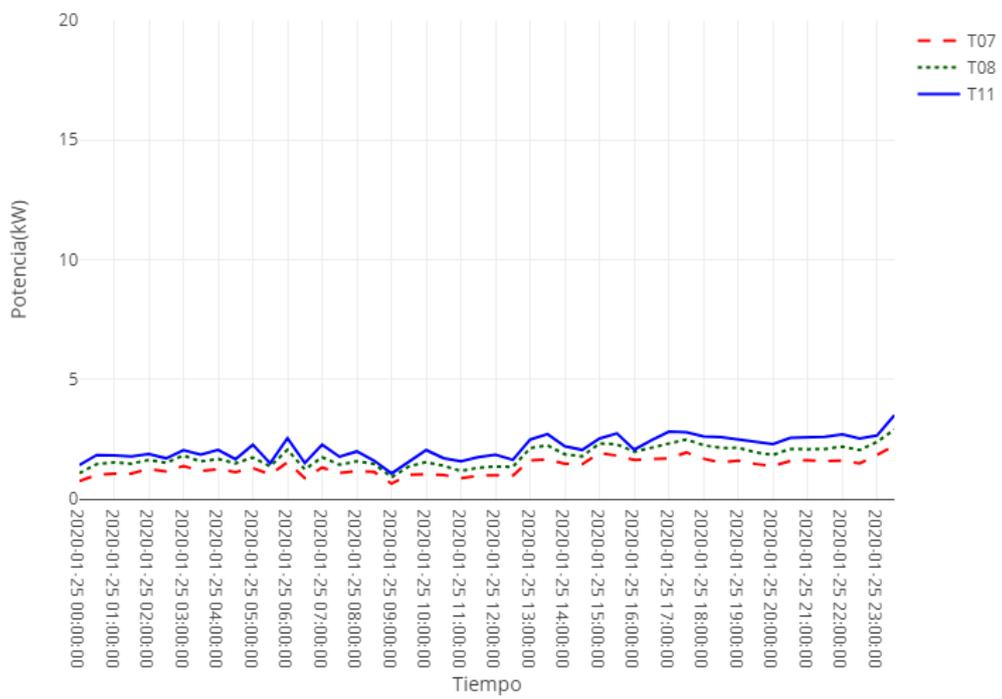
b)



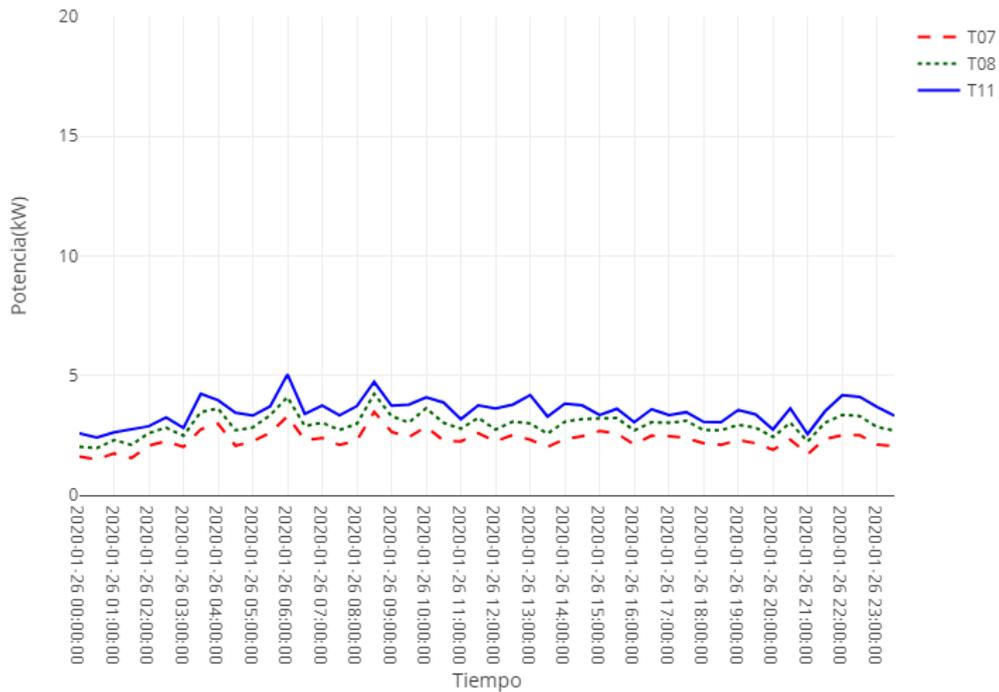
c)



d)



e)

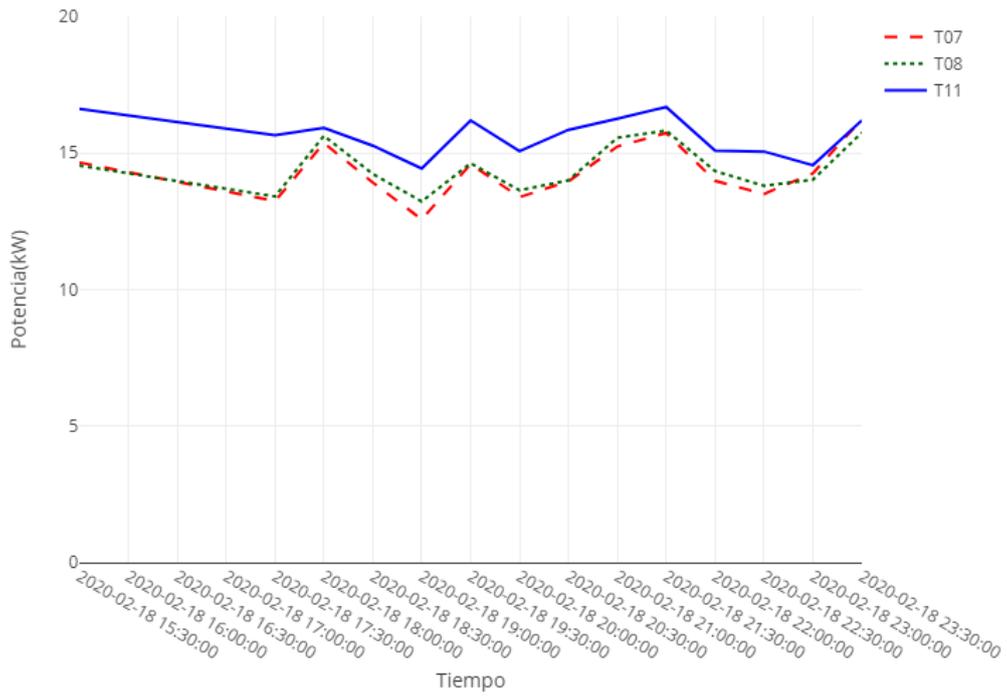


f)

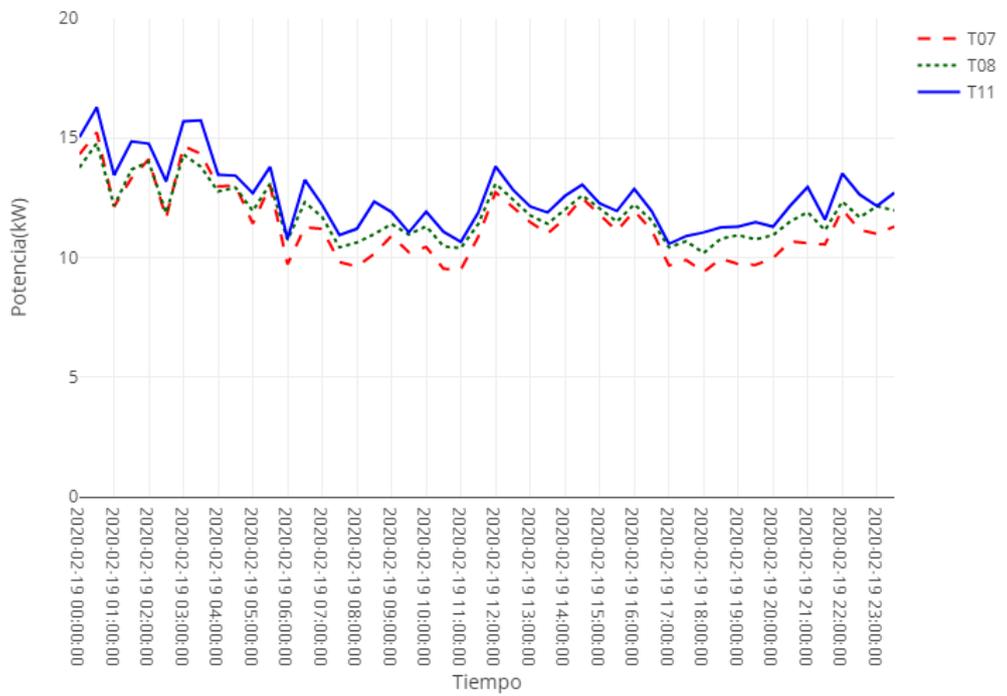
Figura 28. Generación de potencia de las turbinas T07, T08 y T11 en enero de 2020. Días 21 (a), 22 (b), 23 (c), 24 (d), 25 (e) y 26 (f)

En las gráficas de estos días de enero (Figuras 28 a-f)) se puede observar que antes del fallo, la turbina T11 generaba una mayor potencia que las turbinas del módulo vecino (turbinas T07 y T08). Se puede observar también que los días 21, 22 y 23 de enero (Figuras 28 a-c)) habría más oleaje ya que la potencia generada sobrepasaba los 5 kW mientras que durante los días 24 y 25 (Figuras 28 d) y e)) el oleaje parece menor, no llegando a superar los 5 kW en ningún momento. El día 26 de enero (Figura 28 f)) en cambio se detecta una pequeña crecida en la producción tras esos dos días de bajo oleaje.

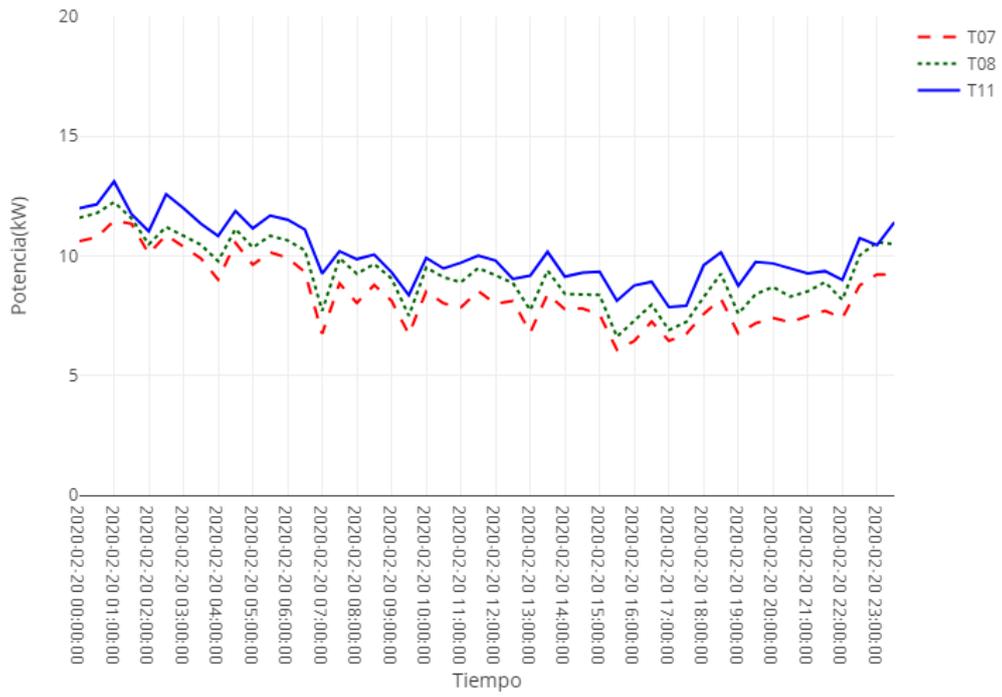
Se analizará también el segundo mes sin incidentes, es decir, el mes de febrero de 2020 (Figuras 29 a-f)).



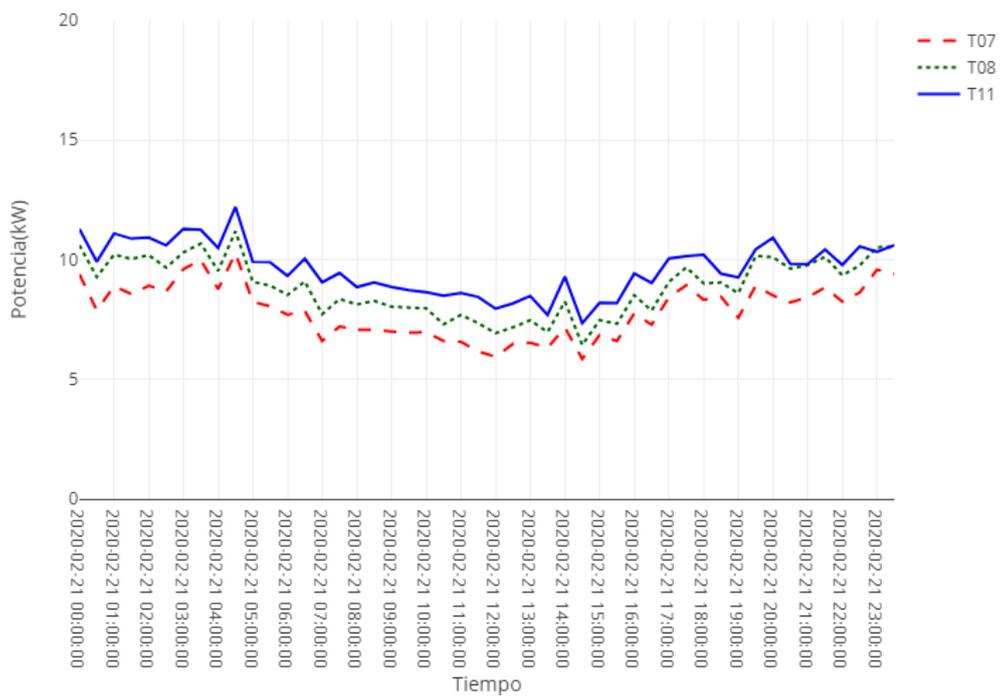
a)



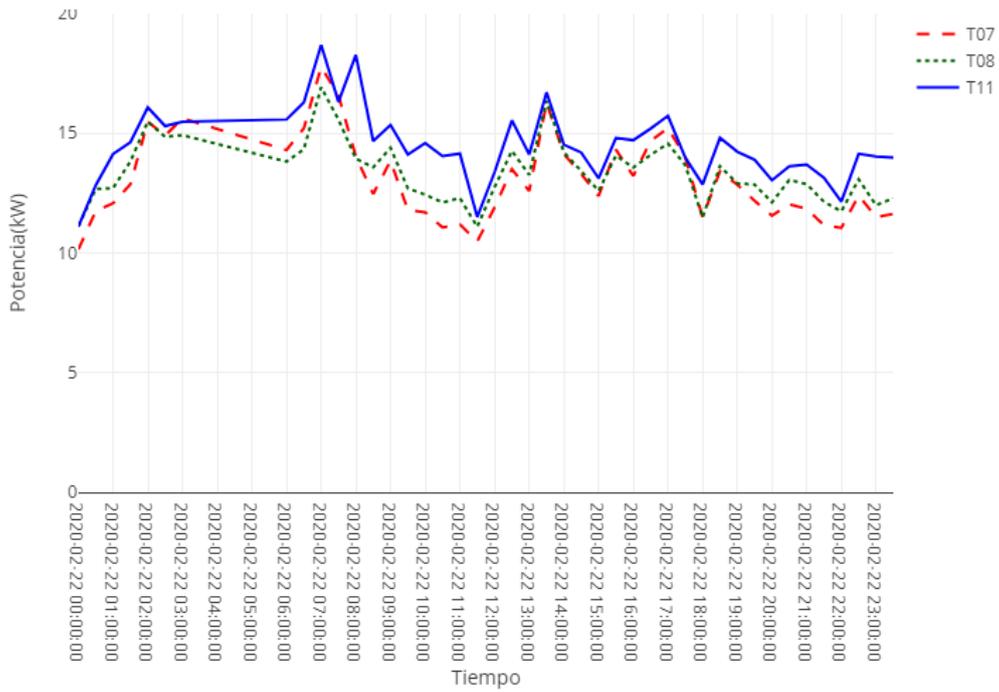
b)



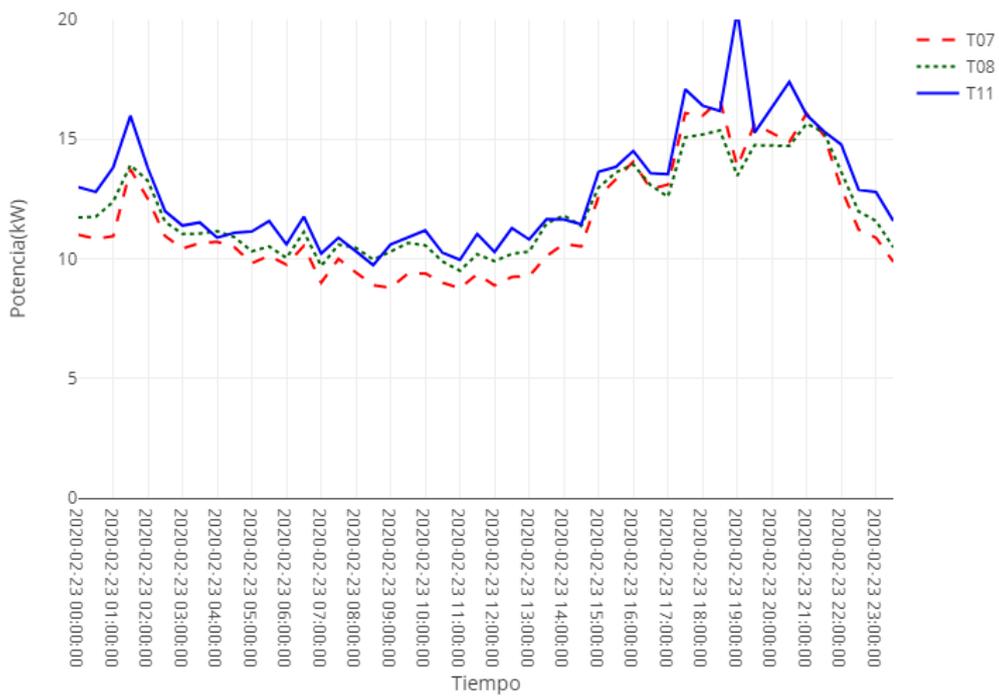
c)



d)



e)



f)

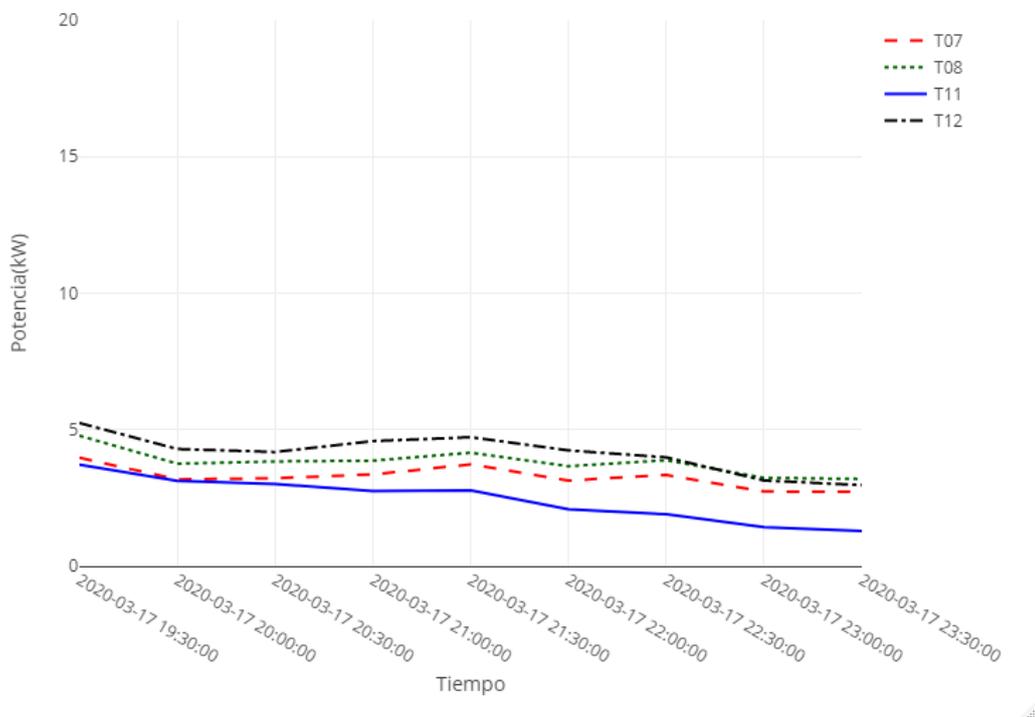
Figura 29. Generación de potencia de las turbinas T07, T08 y T11 en febrero de 2020. Días 18 (a), 19 (b), 20 (c), 21 (d), 22 (e) y 23 (f)

Una vez más queda plasmado que la turbina T11, debido a su buena localización en el dique, genera una cantidad de potencia superior a las otras dos turbinas de las gráficas

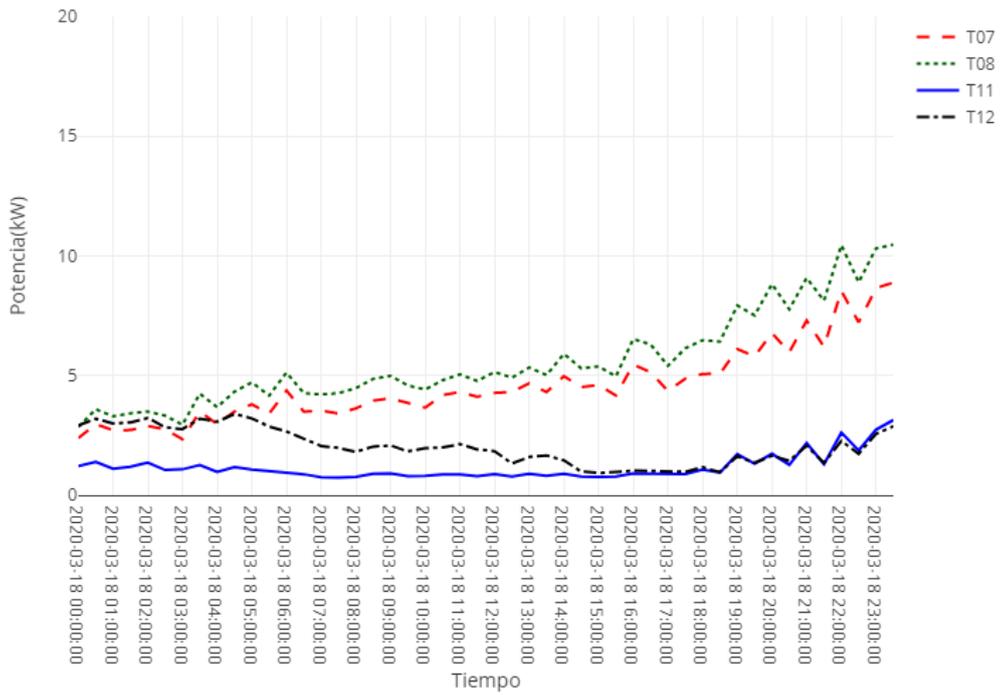
(T07 y T08). Cabe mencionar que el diagrama correspondiente al día 18 de febrero (Figura 29a)) no posee la misma cantidad de información que los demás debido a que no se contaba con datos de estas turbinas antes de las 15:30, y es por ello por lo que el gráfico es diferente. En los gráficos del mes de febrero de 2020 se aprecia además, que este mes fue un muy buen mes en cuanto a generación de potencia, ya que todos los días graficados superan siempre los 5 kW de potencia generada, alcanzando en algunos casos incluso los 15 kW de potencia o hasta los 20 kW como es el caso del 23 de febrero (Figura 29f)).

Tras este estudio previo que proporciona información de que la turbina T11 cuando trabaja en condiciones normales genera un poco más de potencia que las demás, se procede a analizar las turbinas tras el fallo que se dio en el sistema de limpieza de agua dulce, el 28 de febrero de 2020.

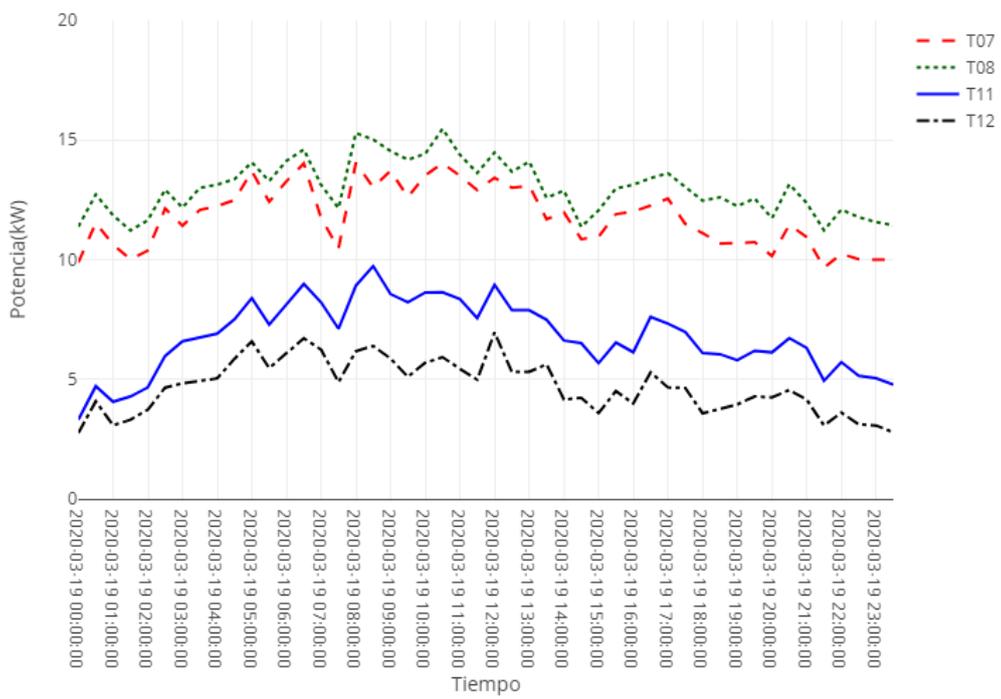
Se empezará por lo tanto exponiendo el mes de marzo de 2020 (días 17-22), que es el primer mes que muestra el efecto de la acumulación de la sal (Figuras 30 a)-f)).



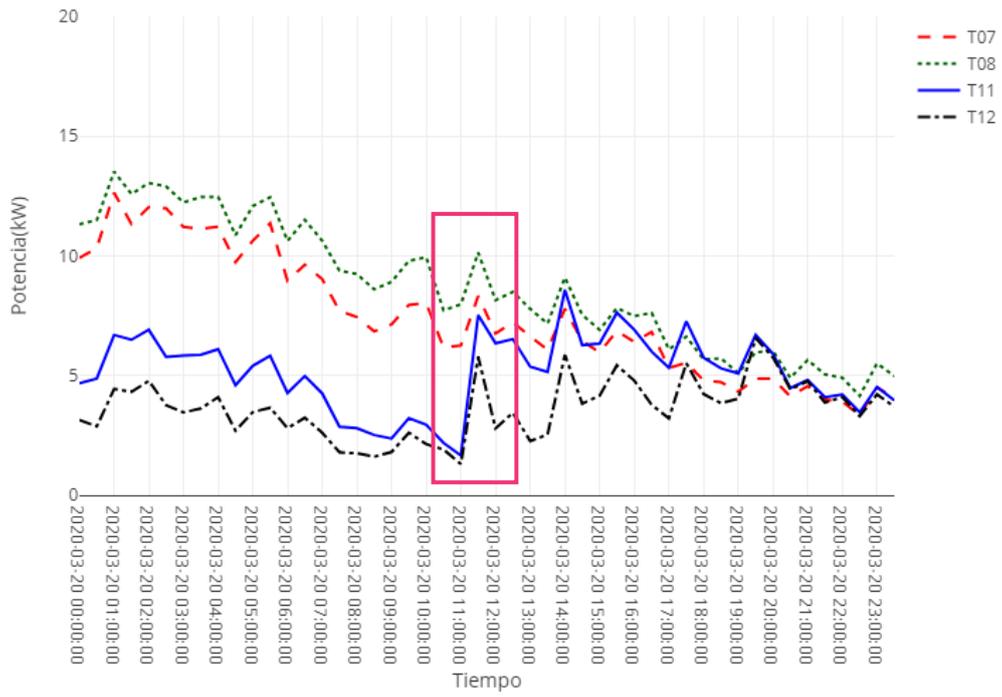
a)



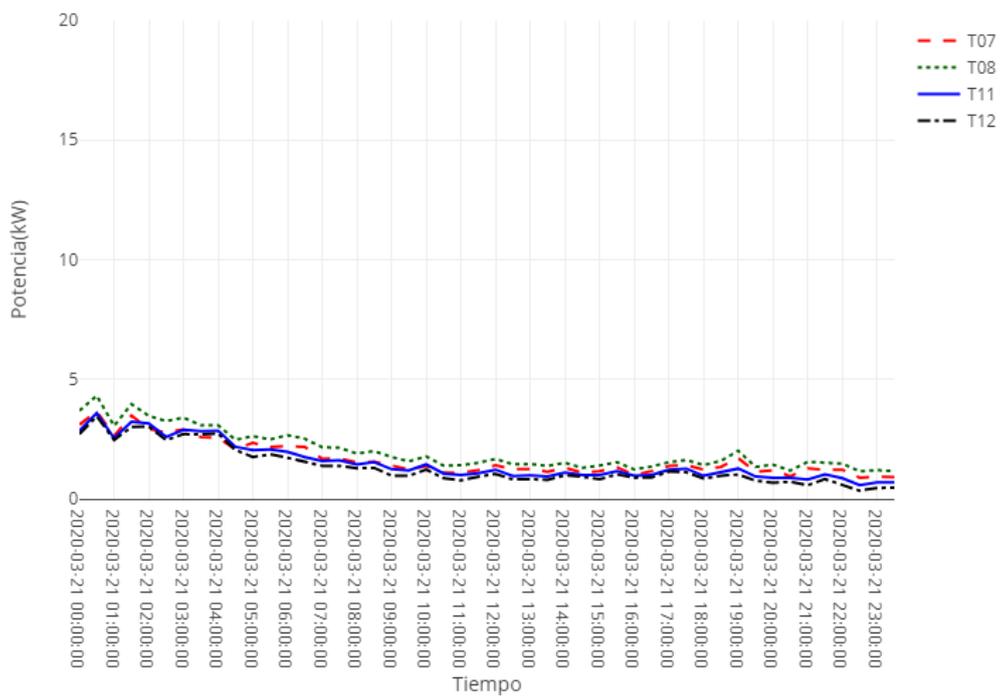
b)



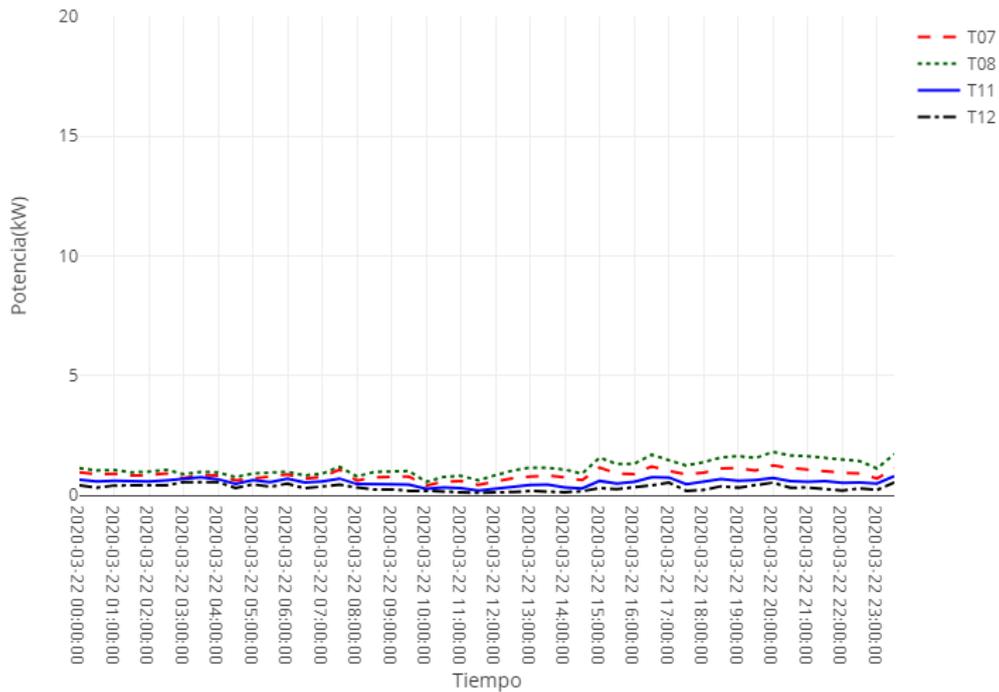
c)



d)



e)



f)

Figura 30. Generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 en marzo de 2020. Días 17 (a), 18 (b), 19 (c), 20 (d), 21 (e) y 22 (f)

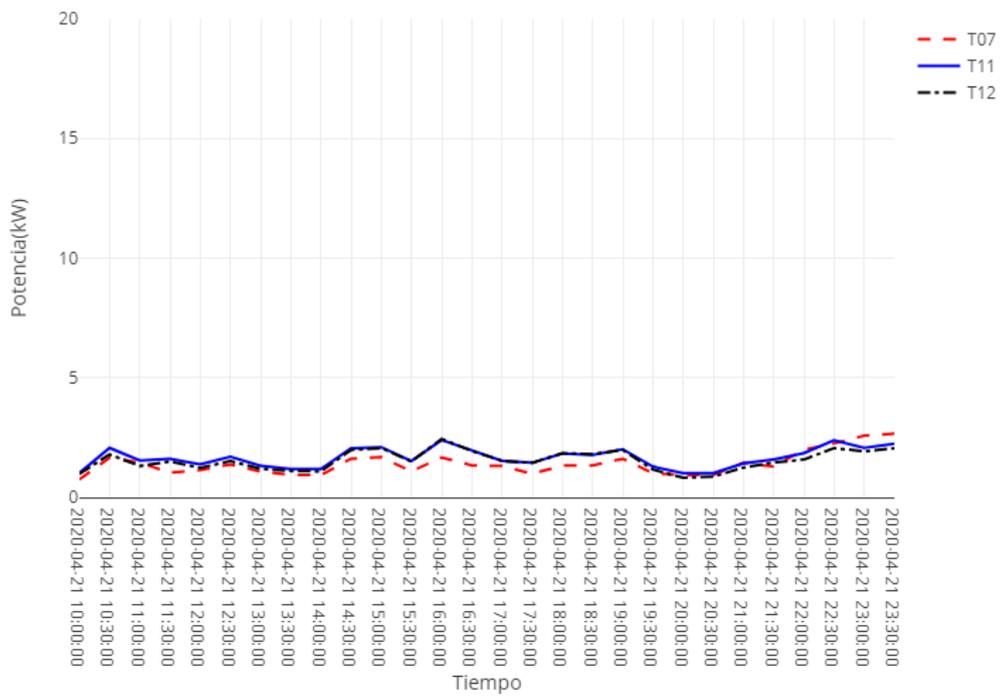
Una vez más, la primera gráfica (Figura 30a)), en este caso correspondiente al 17 de marzo, no cuenta con información de antes de las 19:30 debido a falta de datos.

En este mes de marzo se ve claramente la influencia negativa de la acumulación de sal. Los días 17, 18 y 19 (Figuras 30a) - c)) la generación de potencia de las turbinas T12 y sobre todo la turbina T11 que acostumbra a ser mayor, está bastante por debajo de la generación de potencia de las turbinas T07 y T08. El día 19 (Figura 30c)) se visualiza que mientras que las turbinas T07 y T08 trabajan generando entre 10 y 15 kW las turbinas afectadas T11 y T12 en cambio generan en torno a 5 kW.

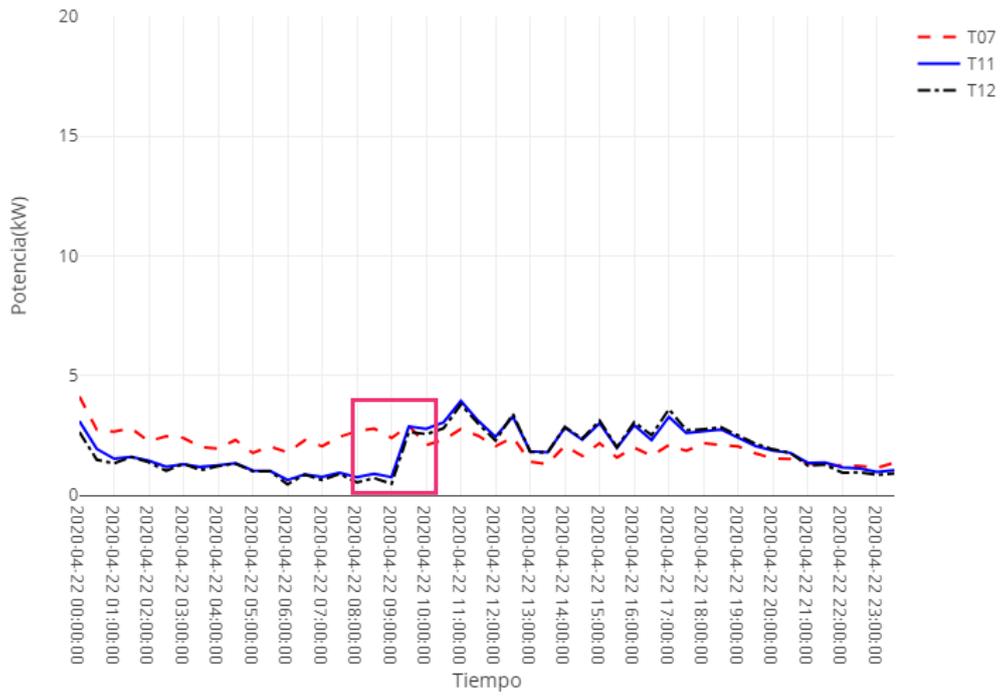
En la gráfica correspondiente al 20 de marzo (Figura 30d)) se percibe que sobre las 11 de la mañana se da un incremento repentino en la generación de potencia tanto de la turbina T11 como de la T12 (recuadro de la Figura 30d)). Para ser más exactos, la turbina T11 pasa de trabajar de un 26,53 % respecto a la T07 a operar en un 90,31 %. Este repentino salto es la representación en términos de potencia de la limpieza manual activada por el operario. En las gráficas correspondientes al 21 y 22 de marzo (Figuras 30 e) y f), respectivamente), se contempla que a bajas potencias la influencia de las

acumulaciones no es tan notoria, aunque, aun así, la generación de potencia de la turbina T07 está un poco por encima de las turbinas afectadas T11 y T12.

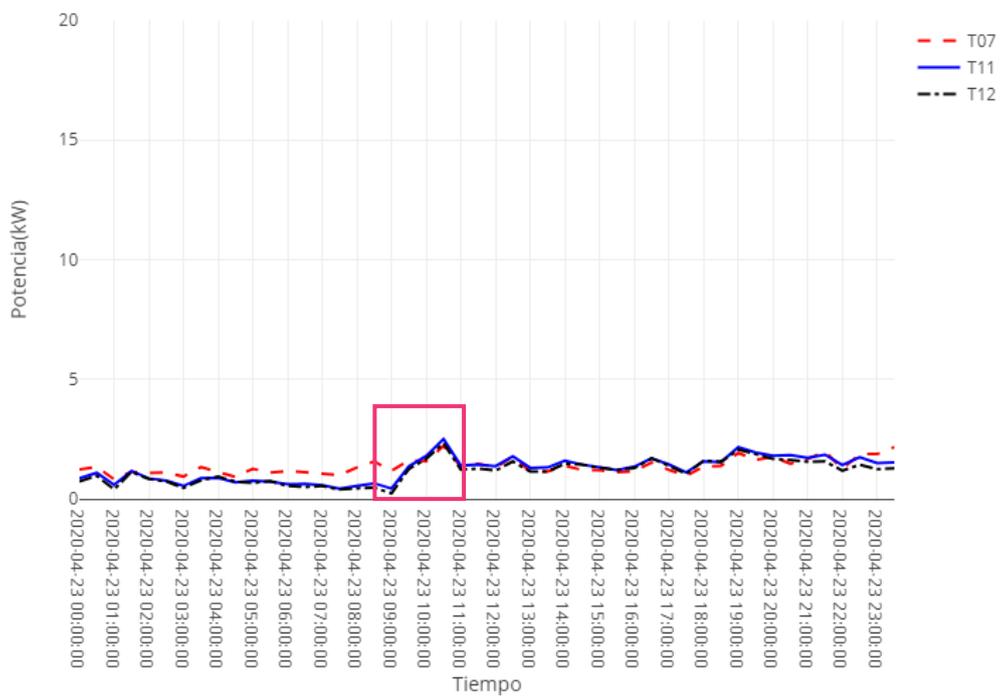
A continuación, se muestran los resultados de generación de potencia de las turbinas T07, T11 y T12 para los días seleccionados en el mes de abril de 2020 (Figuras 31a-f)).



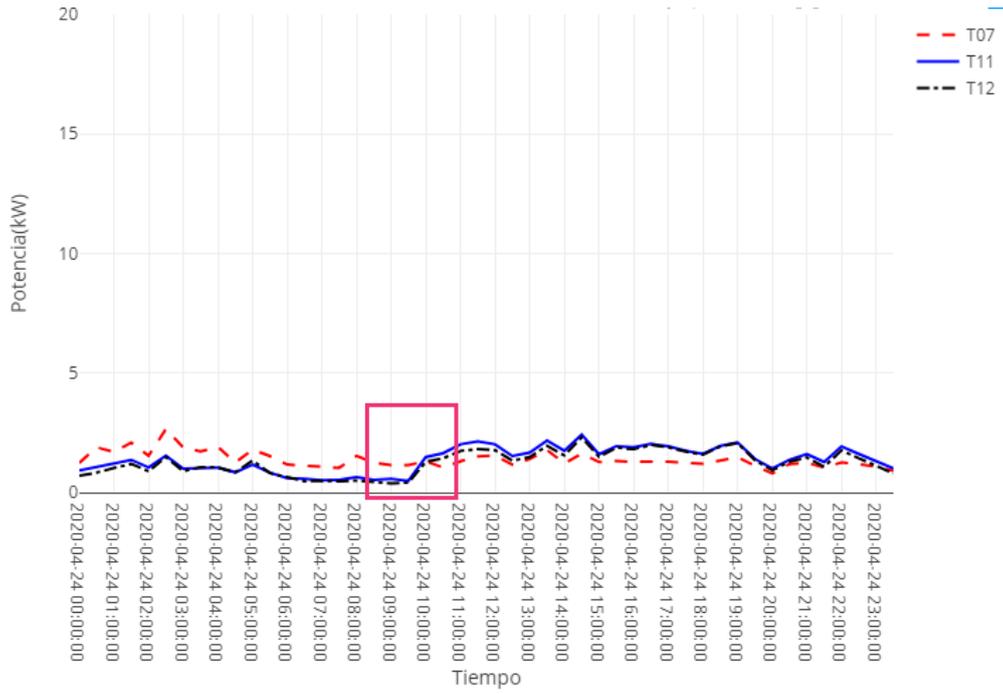
a)



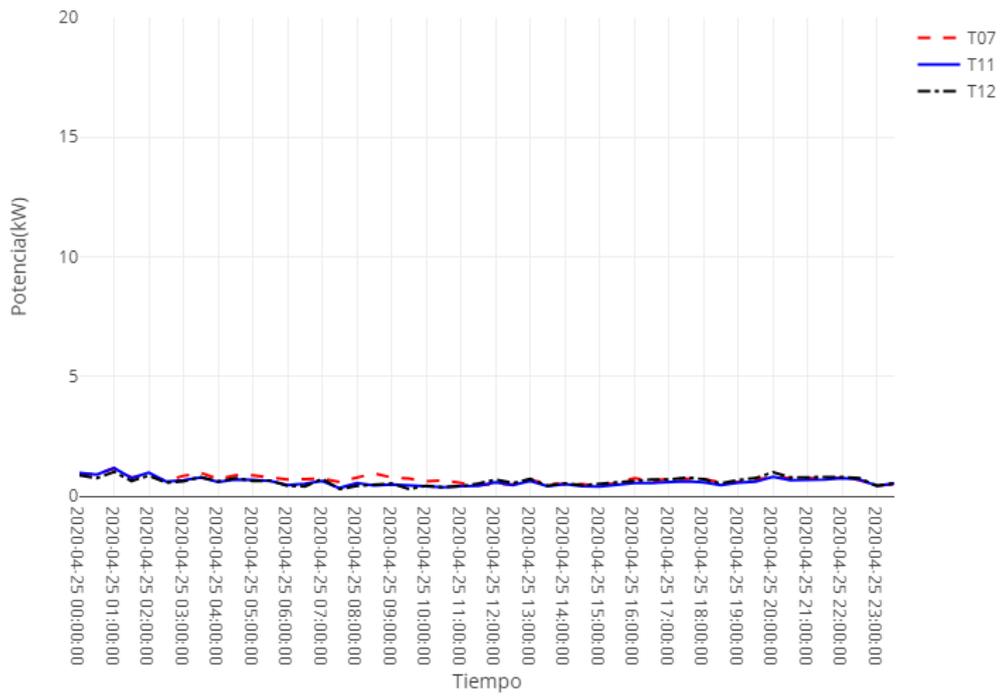
b)



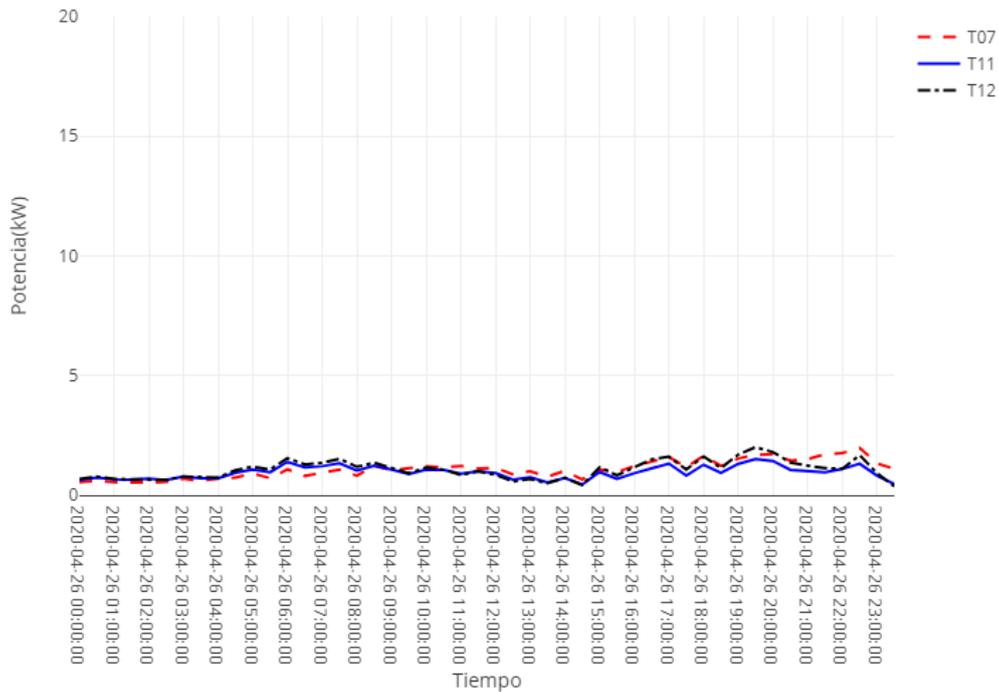
c)



d)



e)



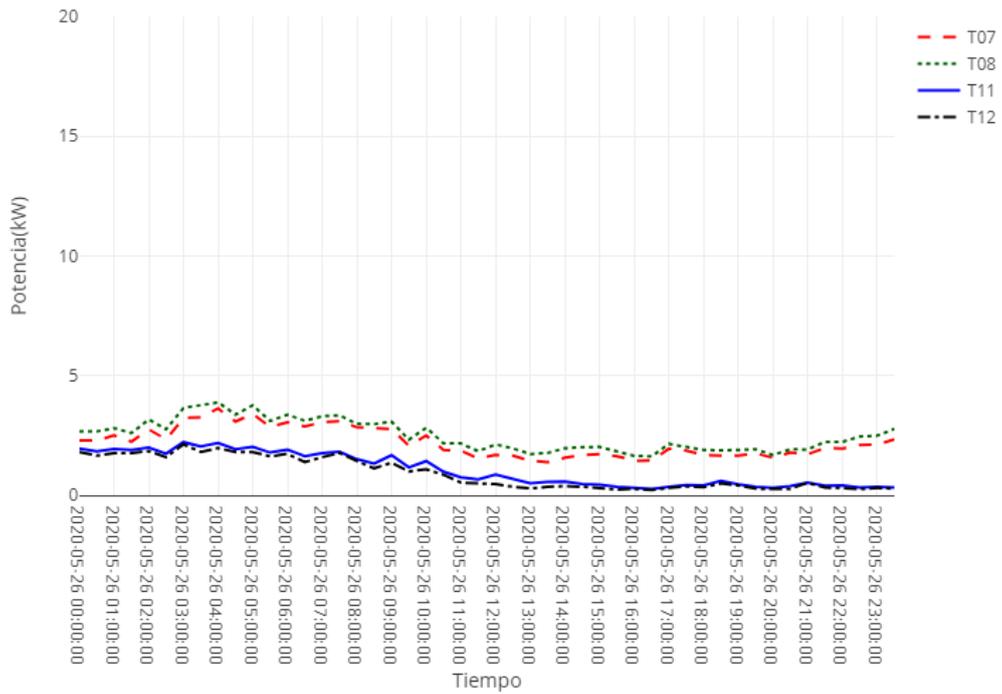
f)

Figura 31. Generación de potencia de las turbinas T07, T11 y T12 en abril de 2020. Días 21 (a), 22 (b), 23 (c), 24 (d), 25 (e) y 26 (f)

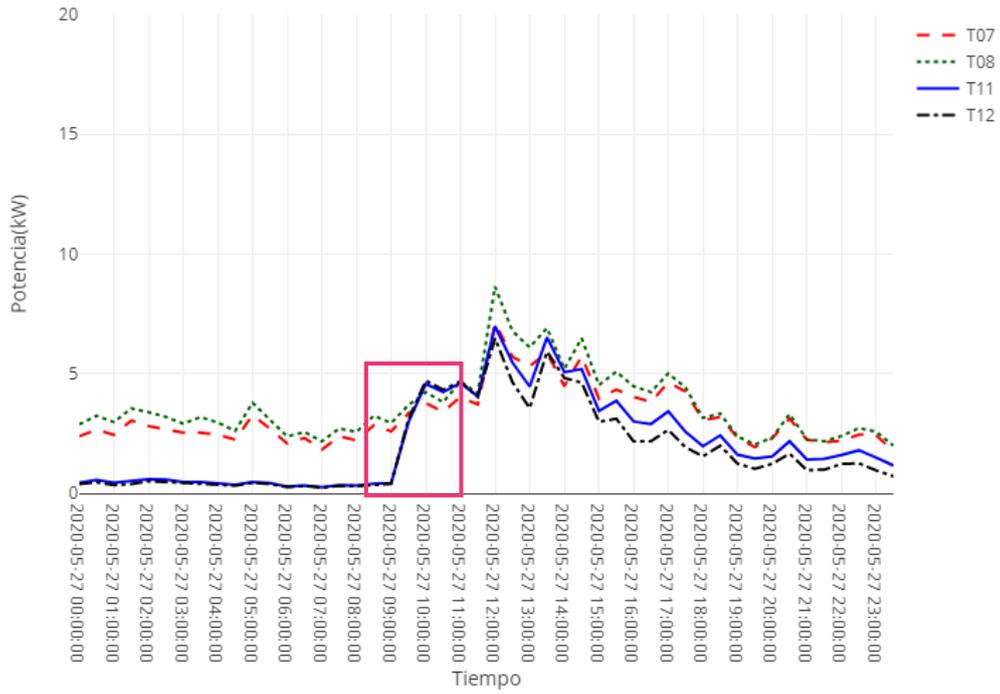
Como era de esperar al ver la gráfica de diagrama de cajas y bigotes del mes de abril de 2020 se confirma que este mes fue un mes de poca generación de potencia en general. No se supera en ninguno de los días estudiados más del 5 kW de potencia generada. Aun así, algunos días permiten nuevamente visualizar el efecto de la limpieza con agua dulce, como por ejemplo los días 22, 23 y 24 de abril (Figuras 31b) - d)). Para ser más exactos el día 22 de abril la turbina T11 pasa de una generación de 0,48 kW a generar 2,65 kW tras la limpieza que tiene lugar sobre las 9:00 de ese día (recuadro de la Figura 31b)). Comparando dichos valores con los de la turbina T07 se obtienen unos porcentajes de generación sobre la turbina T07 de 20,08 % antes de la limpieza y un 91,38 % tras la limpieza. El día 23 de abril, a su vez, tras activarse la limpieza con agua dulce de manera manual (recuadro de la Figura 31c)), ésta pasa de generar 0,23 kW a generar 1,25 kW, es decir, del 19,66 % al 78,13 % de generación respecto a la turbina de control T07. Finalmente, el día 24 de abril, la generación de potencia previa a la limpieza era de 0,42 kW y ésta fue incrementada hasta los 1,28 kW tras la activación del chorro de agua dulce (recuadro de la Figura 31d)). En términos porcentuales, la turbina T11 pasó de trabajar

sobre un 36,52 % previo a la limpieza a un 97,71% tras la limpieza en comparación con la turbina T07.

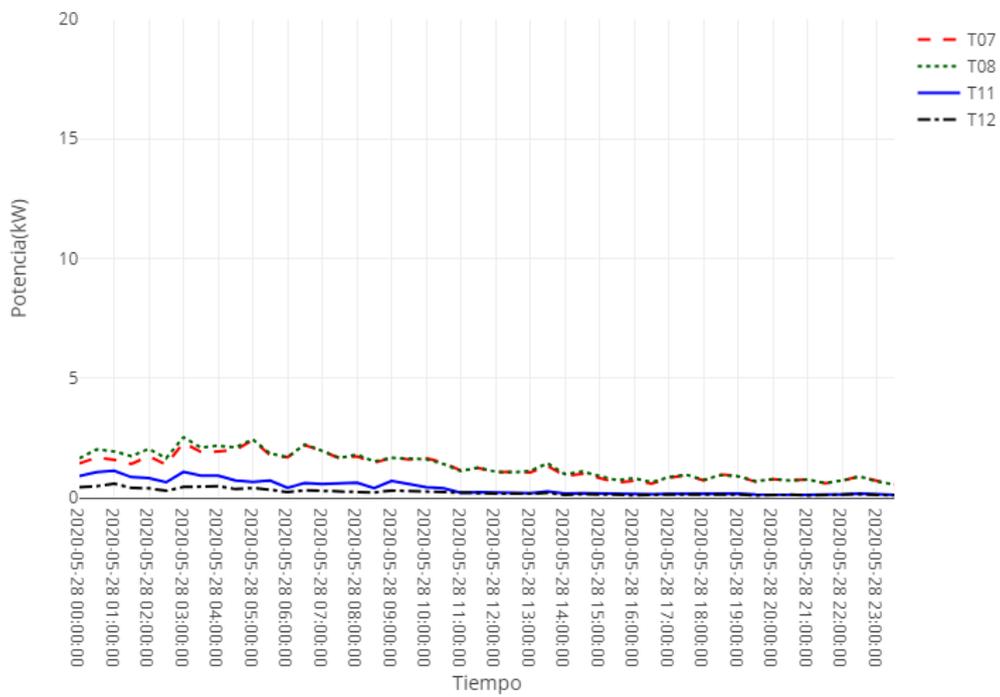
A continuación, se muestran los resultados de generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 para los días seleccionados en el mes de mayo de 2020 (Figuras 32a-f)).



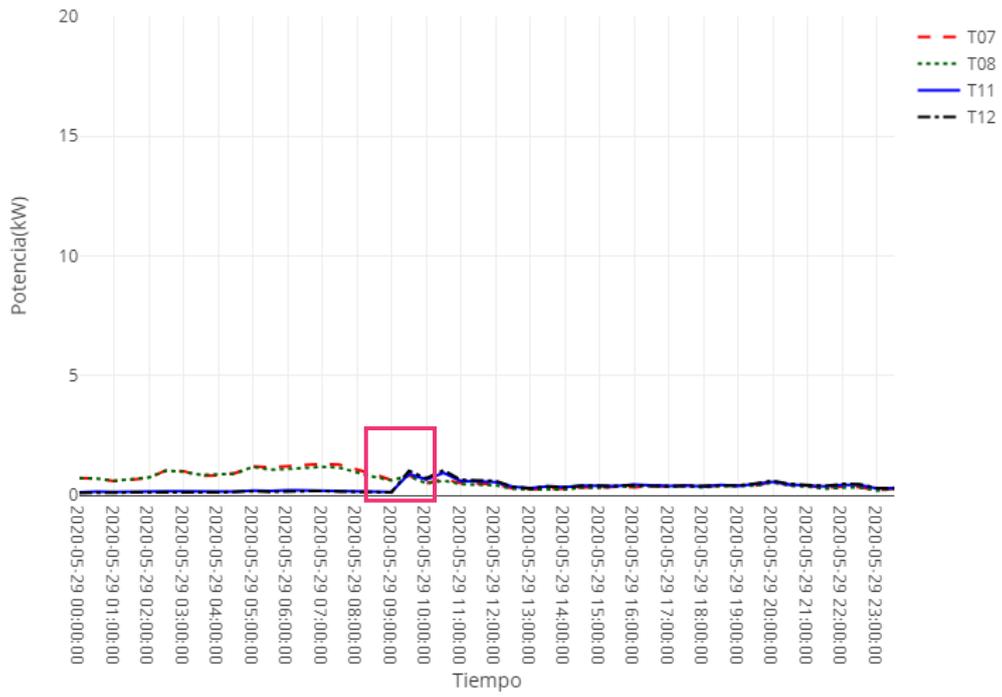
a)



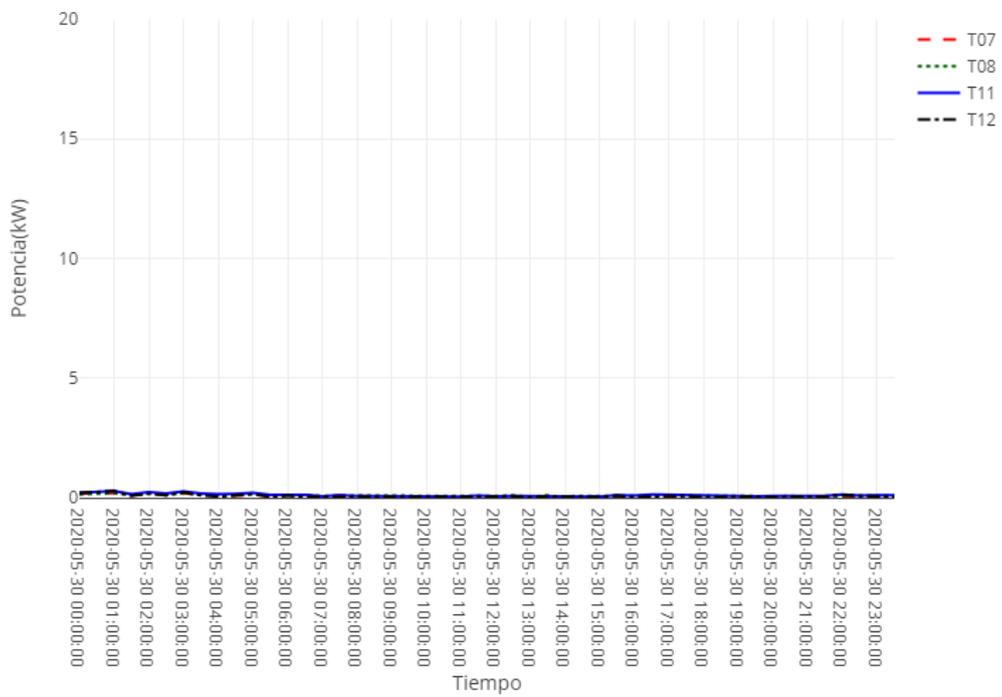
b)



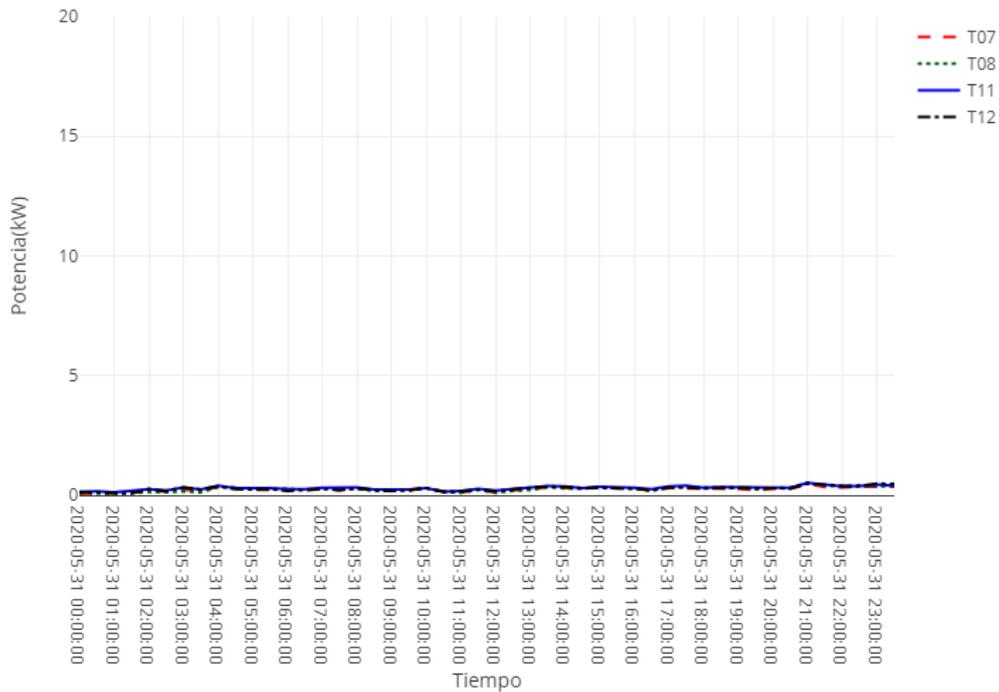
c)



d)



e)



f)

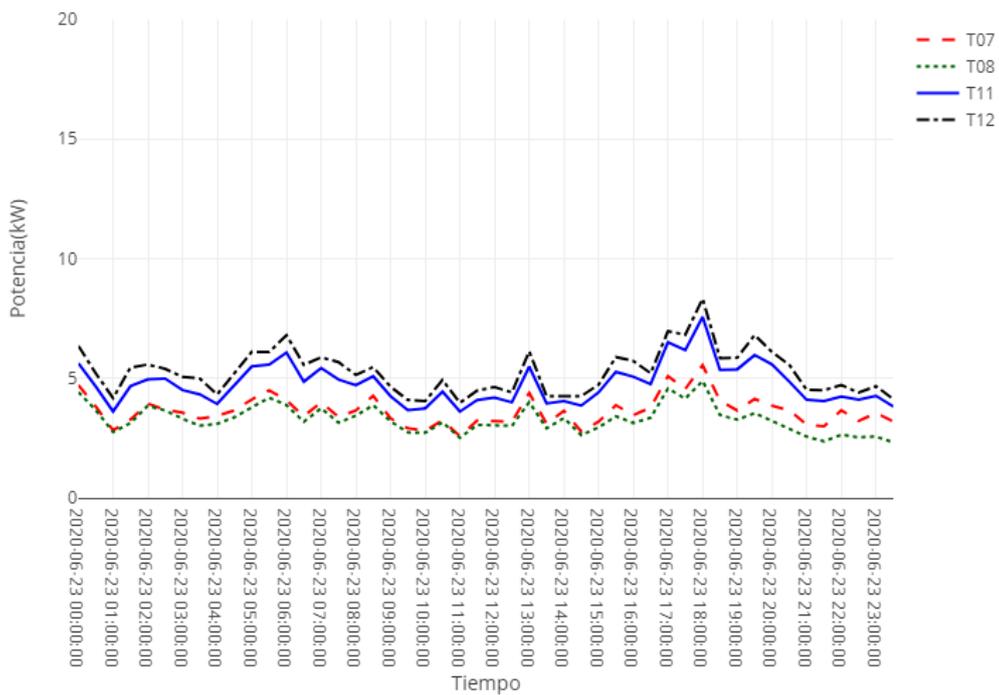
Figura 32. Generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 en mayo de 2020. Días 26 (a), 27 (b), 28 (c), 29 (d), 30 (e) y 31 (f)

En este mes de mayo de 2020, por lo tanto, se pueden observar también un par de días significativos en los que se capta el efecto de la activación manual de la limpieza con agua dulce, como por ejemplo, el día 27 de mayo (recuadro de la Figura 32b)) en el que el salto es muy notorio debido a que es un día de alta generación de potencia, así como el día 29 de mayo (recuadro de la Figura 32d)) que aun siendo un día de poca generación de potencia el salto debido al efecto de la limpieza se puede ver claramente.

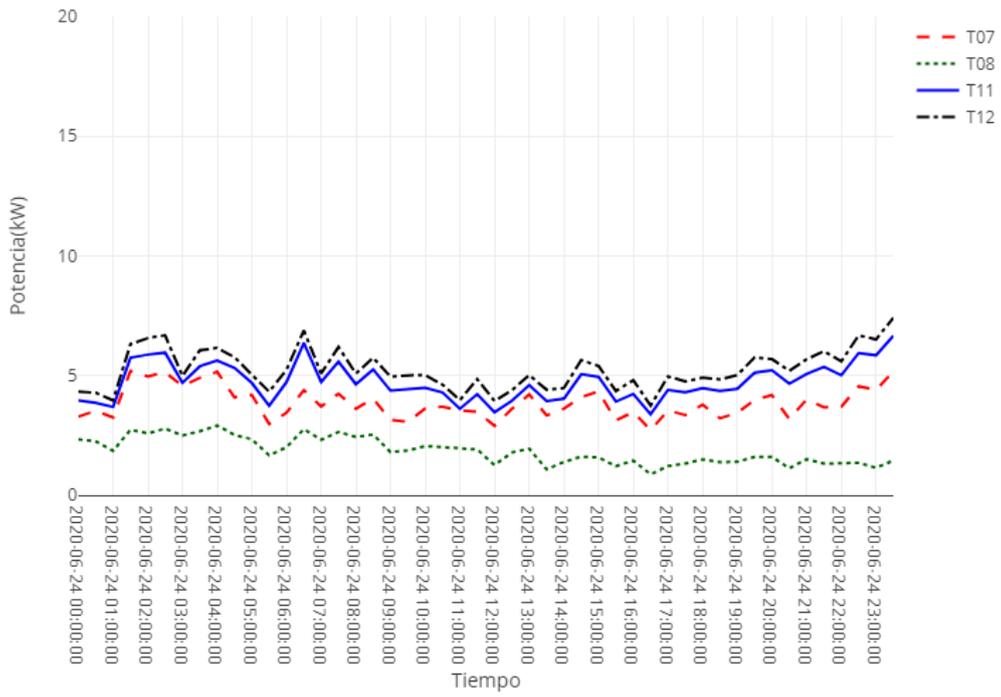
Aunque el mes de mayo de 2020 tampoco fue un mes de mucha generación de potencia, de media en este mes se generaron 1,99 kW en la turbina T07 y 0,82 kW en la turbina T11. También se observa que algún día como por ejemplo el 27 de mayo (Figura 32b)), la potencia generada sobrepasó los 5 kW. Este mismo día, que fue un día bueno en cuanto a potencia generada, la limpieza de los álabes mediante el sistema de agua dulce hizo que pasase de un 16,23 % a un 121,29 % de potencia generada respecto a la turbina T07, es decir, no solo aumentó la potencia, sino que hizo que incluso sobrepasase a la turbina T07. El día 29 de mayo (Figura 32d)) que, en cambio, fue un día de poca generación, el chorro de agua dulce activado manualmente nuevamente hizo que la

turbina T11 sobrepasase a la T07 pasando de un 20,97 % a un 109,88 %. En los demás días no se aprecia la actuación del sistema de limpieza ya sea por la no activación del mismo o debido a que la fuerza de las olas era mínima y por lo tanto no se aprecia en la gráfica.

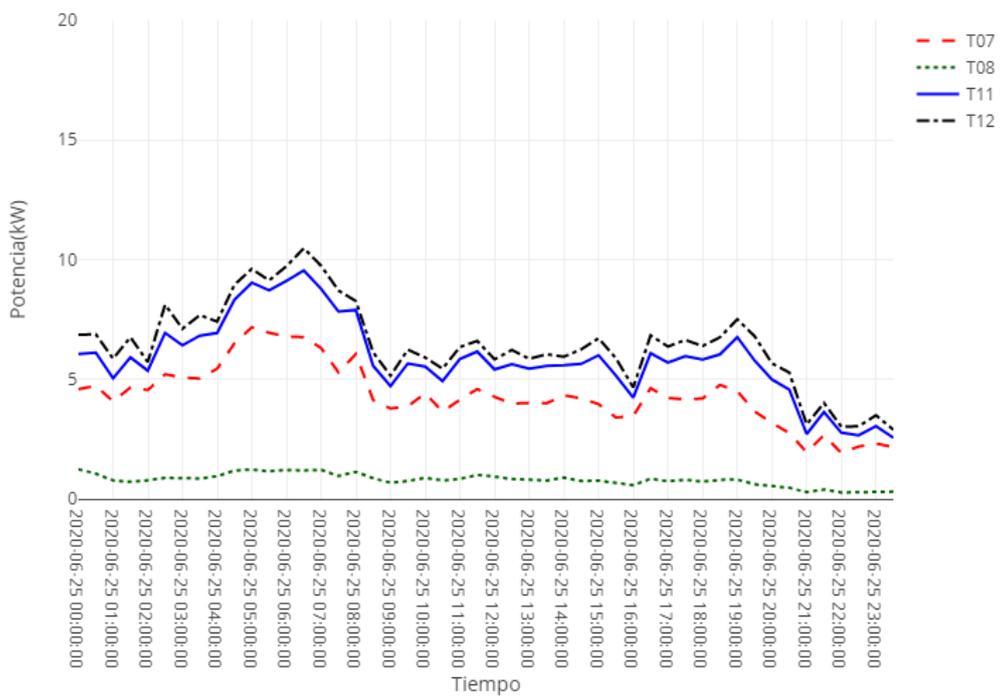
Para finalizar este apartado de resultados se analizará el mes de junio de 2020 (días 23-28) en el que el sistema de limpieza estaba ya completamente arreglado (Figuras 33a-f)).



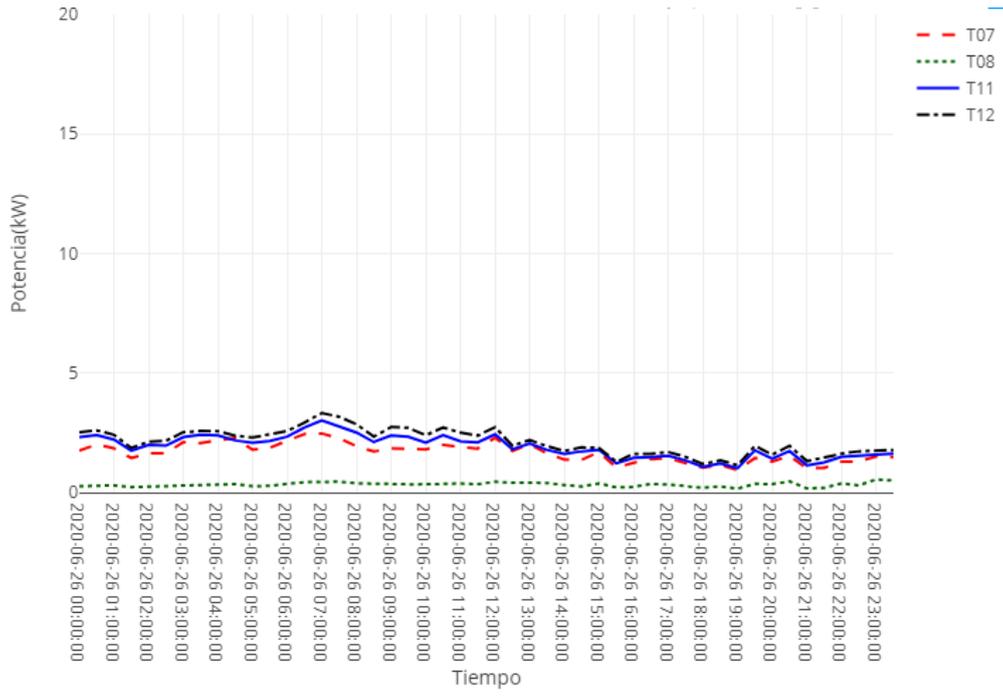
a)



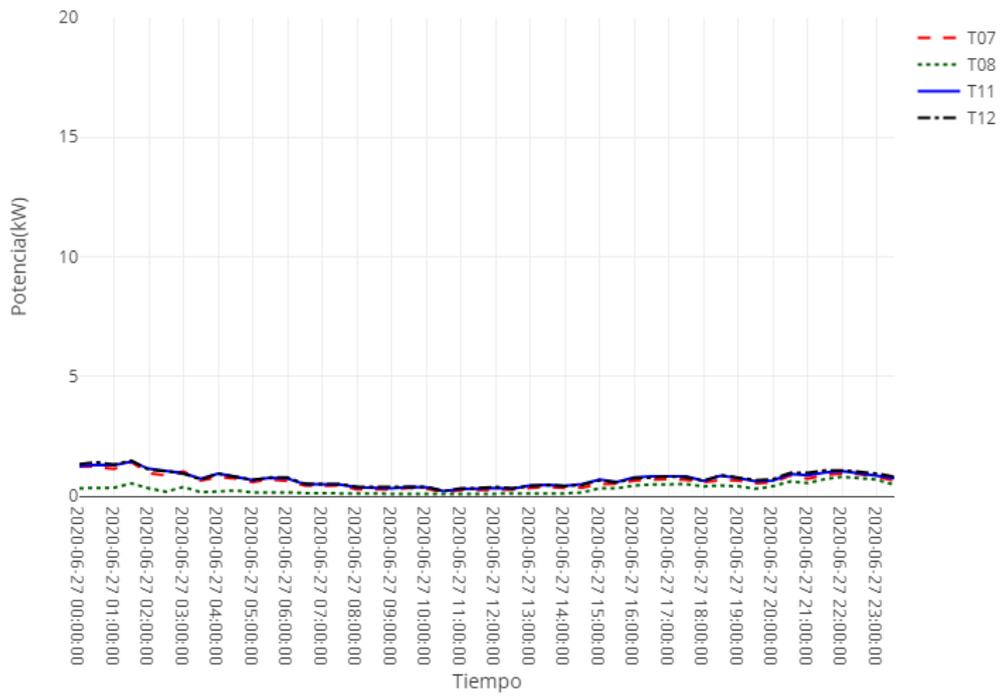
b)



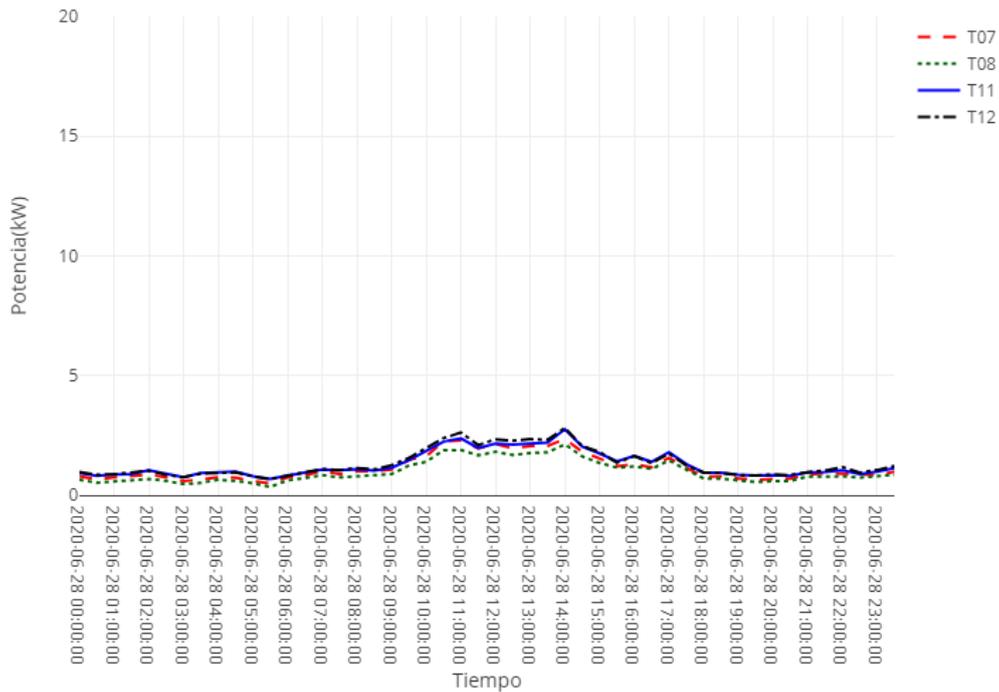
c)



d)



e)



f)

Figura 33. Generación de potencia de las turbinas T07, T08, T11 y T12 en junio de 2020. Días 23 (a), 24 (b), 25 (c), 26 (d), 27 (e) y 28 (f)

En junio de 2020 (Figuras 33 a-f)) por lo tanto, ya se observa una generación de potencia superior tanto de la turbina T11 como de la turbina T12. Al igual que en enero y febrero de 2020, meses en los que el sistema de limpieza funcionaba correctamente, las turbinas T11 y T12 superan a las turbinas T07 y T08, señal de que el problema ha sido solucionado. Hay que mencionar que a partir del día 24 de junio (Figura 33b)) se nota una tendencia descendente en la generación de potencia de la turbina T08 que con el paso del tiempo se hace cada vez más notoria. Este fenómeno se debe a un problema surgido en dicha turbina a causa de un rozamiento de la turbina. Además, se vio que esa turbina poseía un movimiento axial importante. Una semana más tarde la máquina fue desmontada y se vio que las tapas que sujetan el rodamiento estaban bastante gastadas, produciendo así una holgura y en consecuencia un movimiento axial que desencadenó en el mal funcionamiento de la turbina. Esta turbina será analizada más a fondo mediante un estudio de las vibraciones sufridas por la misma que se expondrá en el apartado 5.4.

El sistema de limpieza de agua dulce, no solo se encarga de limpiar los álabes de las turbinas para aumentar la generación de potencia de las mismas, sino que también es utilizado como protector de los efectos corrosivos de la sal, ya que el entorno marino tiende a desgastar cualquier tipo de material que es sometido a él. Para analizar la capacidad corrosiva de la sal proveniente del ambiente marino, se ha tomado como referencia un ensayo realizado en Méjico de la aleación de Aluminio de la serie 6000 (Al-Mg-Si), que posee propiedades similares a la serie 5000 respecto a la resistencia a la corrosión, en el que se expusieron unas probetas al ambiente marítimo durante 6 y 12 meses. Las probetas se elaboraron con la geometría establecida por las normas ASTM-B211 y se expusieron al ambiente marino de Mazatlán, Sinaloa. Posteriormente se llevaron a cabo ensayos de tensión de estas probetas en el laboratorio [30].

A los seis meses de exposición se distinguían concentraciones blancas en ciertas zonas del material debido a la sal. Estas acumulaciones de sal dieron lugar al desarrollo de picadura en la probeta. Las probetas se sometieron al ensayo de carga uniaxial obteniéndose que la probeta virgen soportó una carga máxima de 10,55 kN con un desplazamiento de 7,15 mm, mientras que la probeta expuesta 6 meses soportó una carga de 10,19 kN con un desplazamiento de 3,33 mm y la expuesta 12 meses una carga de 10,53 con un desplazamiento de 2,78 mm. Las diferencias fueron muy notorias ya que la probeta virgen presentó la formación de cuello mientras que el resto de probetas no y además la rotura de las probetas sucedió donde hubo acumulación de grumos blancos. Analizando los resultados obtenidos se concluyó lo siguiente:

- La presencia de corrosión localizada en el aluminio debido a la interacción con el ambiente marino disminuyó las propiedades de ductilidad de las probetas y éstas mostraron concentraciones de esfuerzos considerables en las zonas donde se desarrolló la corrosión.
- Un análisis fractográfico indicó que la interacción con este tipo de ambientes produjo que el material se fragilizase dando lugar a fallas y creando zonas de picadura intragranular debidas a la corrosión.
- El tiempo de exposición es directamente proporcional al agrietamiento originado en los productos, puesto que la superficie de agrietamiento de las probetas de 6 meses era menor que las que estuvieron expuestas 12 meses.

Este estudio se realizó a probetas que no se encontraban soportando ningún tipo de esfuerzo. Los álabes de las turbinas de Mutriku se ven afectados de manera similar por la corrosión, añadiendo el agravante de que están sometidos a las fuerzas del aire y el movimiento giratorio. Aunque el sistema de limpieza con agua dulce prolongue la vida de los álabes de las turbinas, es razonable pensar que este tipo de corrosión y abrasión que se dan en los álabes son los causantes de una gran parte de las roturas y fallos mecánicos producidos en las turbinas de la planta undimotriz de Mutriku.

5.4 ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN LAS TURBINAS DE ESTUDIO

Como ya ha sido mencionado antes, el ambiente marino posee un gran potencial corrosivo que afecta al material de la superficie de los álabes de las turbinas provocando su fragilización. Todos estos problemas ocasionan un mal funcionamiento de la turbina, el aumento de las vibraciones de la máquina y, en el peor de los casos, una rotura anticipada de los álabes debido a la fatiga.

En cuanto a las vibraciones, éstas se pueden considerar como las oscilaciones o movimientos repetitivos de pequeña amplitud alrededor de una posición de equilibrio, causados por una excitación. La fuerza excitadora se da en las piezas generadoras de movimiento. En el caso de las turbinas de la planta undimotriz de Mutriku, la fuerza excitadora sería generada por la turbina. Esta fuerza se transmitiría al eje del sistema generando vibraciones en la máquina. Las vibraciones en la turbina se ven agravadas si se dan problemas de desequilibrio, por ejemplo. El desequilibrio se da cuando el centro de masa no coincide con el centro geométrico. Este fenómeno suele ser causado por diversas causas como, la falta de homogeneidad en los materiales, error en las tolerancias, desgaste irregular de los componentes de la máquina rotativa o debido a depósitos de material acumulados durante la operación [28]. Estas dos últimas podrían considerarse las razones principales de las vibraciones generadas en las turbinas de la planta de Mutriku ya que se tiene constancia de que en los álabes existe dicha acumulación irregular de material (depósitos de sal) y que el duro entorno marino genera corrosión en las turbinas.

En este apartado, por lo tanto, se tratarán de exponer una serie de gráficas para analizar las vibraciones en función de la velocidad de rotación de la turbina T11 con la intención

de ver si la acumulación de sal refleja vibraciones anómalas. También se estudiarán las vibraciones de la turbina T08 para ver si se puede encontrar un indicativo de que la turbina acabaría fallando en junio de 2020. La turbina T08 no fue afectada por el fallo en el sistema de limpieza de agua dulce por lo que la causa de su comportamiento no parece que esté relacionado con la acumulación de sal.

Los datos utilizados para este análisis han sido expuestos en gráficos de nube de puntos o dispersión mediante los cuales se puede observar cómo se relacionan dos variables de forma intuitiva. Las variables a analizar han sido, la velocidad de rotación (en revoluciones por minuto o rpm) representada en el eje X y las vibraciones generadas en la turbina (en milímetros por segundo o mmps) en el eje Y. Para una mejor lectura de estos gráficos se ha representado mediante puntos amarillos la media de los datos estudiados. Los días seleccionados para este estudio se muestran a continuación (Figura 34).



Figura 34. Días seleccionados para el análisis de vibraciones.

El día elegido para analizar las vibraciones del mes de enero de 2020 fue el 21 (Figura 35).

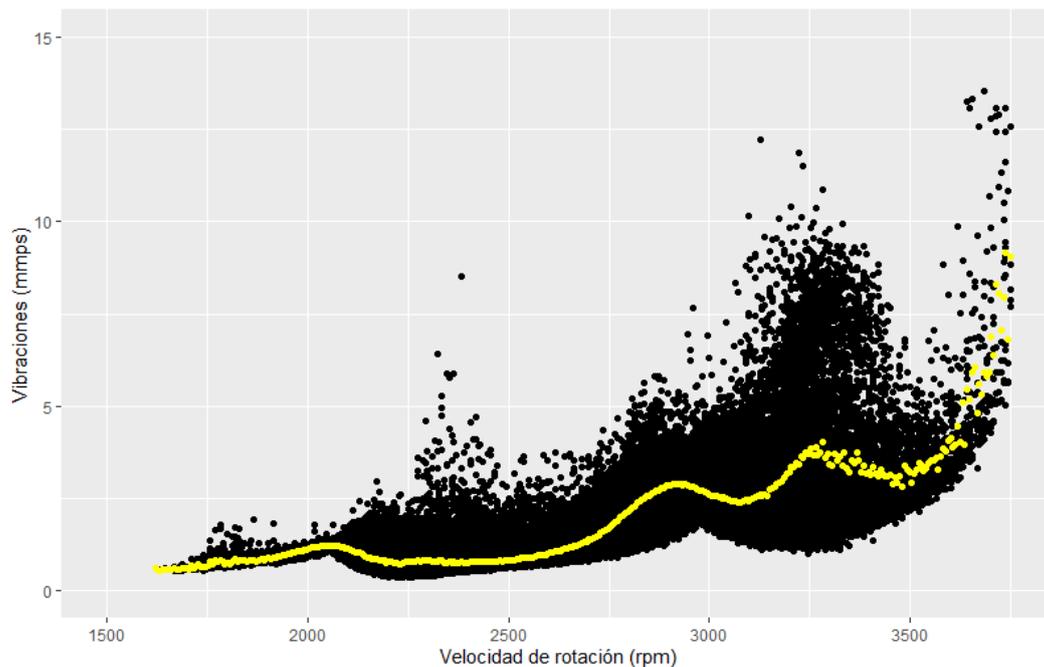


Figura 35. Análisis de las vibraciones del 21 de enero de 2020 en la turbina T11.

Este día de enero la generación de potencia de la turbina T11 estuvo entre unos 5 kW y 10 kW (Figura 28a)). Podemos ver en la gráfica de la figura 35 como en general los puntos negros que representan las vibraciones de las turbinas no se separan mucho de la línea amarilla la cual representa la media de las vibraciones. También se puede observar que a partir de 3000 rpm las vibraciones empiezan a ser más dispersas, como consecuencia de la alta velocidad de rotación. Es por ello que las turbinas de Mutriku están equilibradas para que las turbinas traten de trabajar alrededor de las 2500 rpm, y así evitar dichos picos de vibraciones que se observan a las 2000 y 3000 rpm [29]. A las vistas de estos resultados, se podría decir que las vibraciones de esta turbina se encuentran dentro de lo esperado y que su funcionamiento es normal.

A continuación, se muestran los datos de febrero de 2020 en los que aun no se tenía ningún tipo de problema con el sistema de limpieza con agua dulce en las turbinas T11 y T12, por lo que los datos deberían ser similares a los de enero de 2020 y deberían poder ser utilizados como referencia.

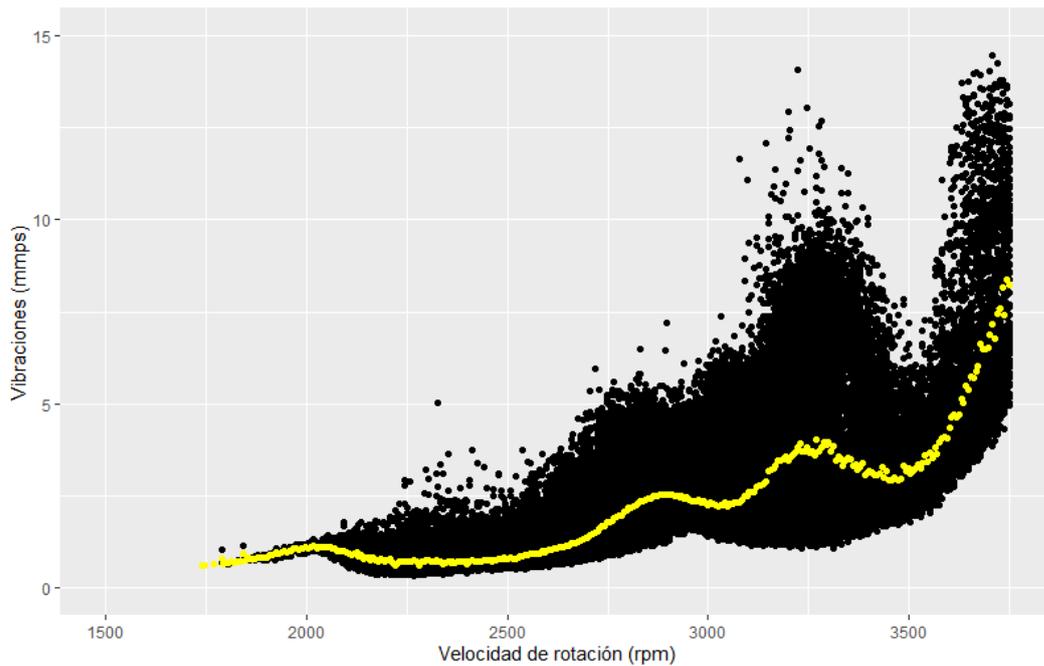


Figura 36. Análisis de las vibraciones del 21 de febrero de 2020 de la turbina T11.

La gráfica de la figura 36 corresponde al 21 de febrero de 2020 donde la potencia generada de la turbina T11 fue entorno a unos 10 kW (Figura 29d). Una vez más, las vibraciones representadas en negro no difieren mucho de la media en amarillo excepto a partir de las 3000 rpm donde ya la fuerza de rotación es tan alta que las vibraciones se hacen más notorias. Comparando la gráfica de este mes con la del mes de enero de 2020 (Figura 35) vemos una gran similitud, encontrándose los valles y los picos de vibración sobre las mismas velocidades de rotación.

Aprovechando que febrero de 2020 fue el mes de mayor generación de potencia se mostrará la gráfica correspondiente a un día de generación alta. El objetivo de visualizar este día sería el de determinar si las vibraciones se ven afectadas por la crecida de la generación de potencia. El día escogido fue el 19 de febrero (Figura 37) donde la potencia generada anduvo entorno a los 15 kW (Figura 29b)).

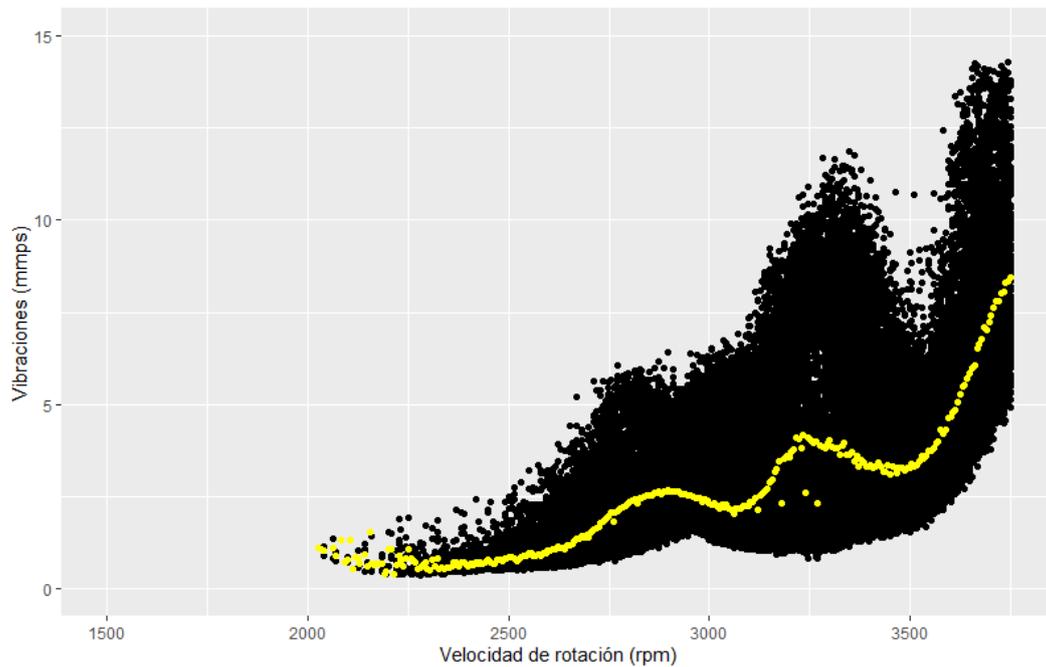


Figura 37. Análisis de las vibraciones del 19 de febrero de 2020 de la turbina T11.

En el diagrama de dispersión de la figura 37 se puede apreciar que al ser un día de mucha potencia el eje de la turbina giraba a más velocidad que un día de poca potencia, lo que queda reflejado en que, por ejemplo, los datos aparecen representados a partir de las 2000 rpm. Además, al girar a más revoluciones, la mayor densidad de puntos se encuentra a partir de las 3000 rpm. La curva amarilla que representa la media de las vibraciones también refleja esta mayor generación al presentar valores ligeramente superiores que los obtenidos a menor potencia. Por lo que se concluye que, a mayor potencia generada, mayor es la velocidad de rotación y por lo tanto las vibraciones se ven agravadas.

En el mes de marzo de 2020 el sistema de limpieza con agua dulce ya estaba fallando y por lo tanto se empezó a acumular la sal en los álabes de las turbinas.

El día 18 de marzo la generación de potencia en la turbina T07, turbina que estaba en buen estado, fue de entre 5 kW y 10 kW (Figura 30b) mientras que en la turbina T11 no superó los 5 kW.

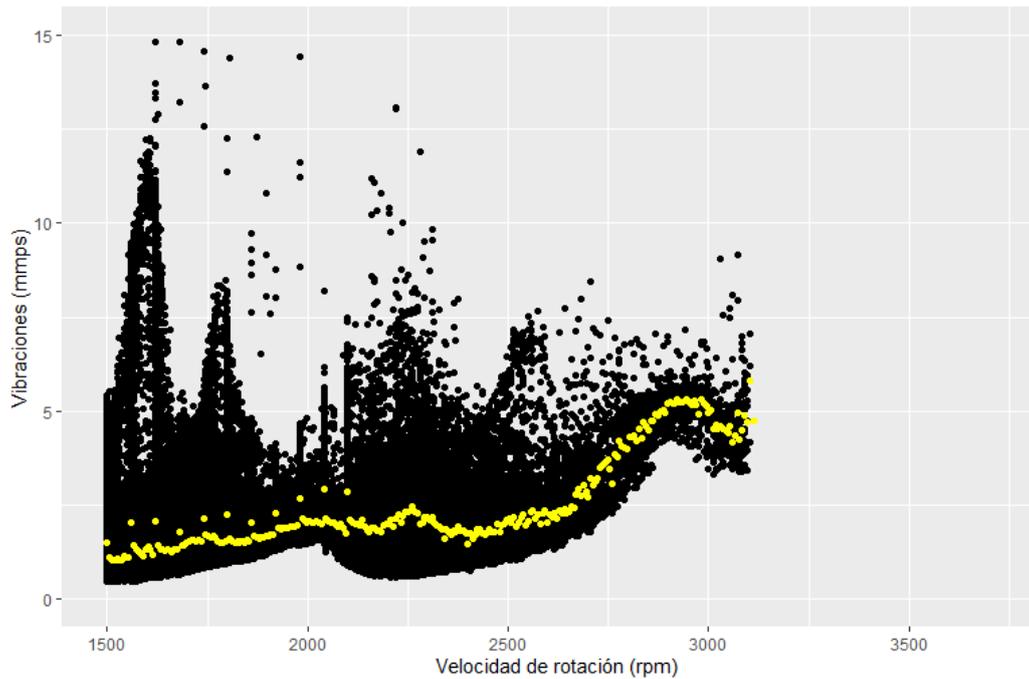


Figura 38. Análisis de las vibraciones del 18 de marzo de 2020 de la turbina T11.

Si se observa la figura 38, ahora la nube de puntos de las vibraciones de la turbina T11 en la que la sal se estaba acumulando, cambia completamente si se compara con la de meses anteriores. Hay gran cantidad de puntos que se alejan considerablemente de la curva amarilla a revoluciones bajas entorno a las 1750 rpm. Además, la curva amarilla deja de tener el patrón que solía tener de picos y valles.

A continuación, se analizará también el día 19 de marzo de 2020, en el que la generación de las turbinas en buen estado, turbina T07 (Figura 30c)), rondaba los 10-15 kW, mientras que la turbina T11 generaba únicamente de 5 a 10 kW.

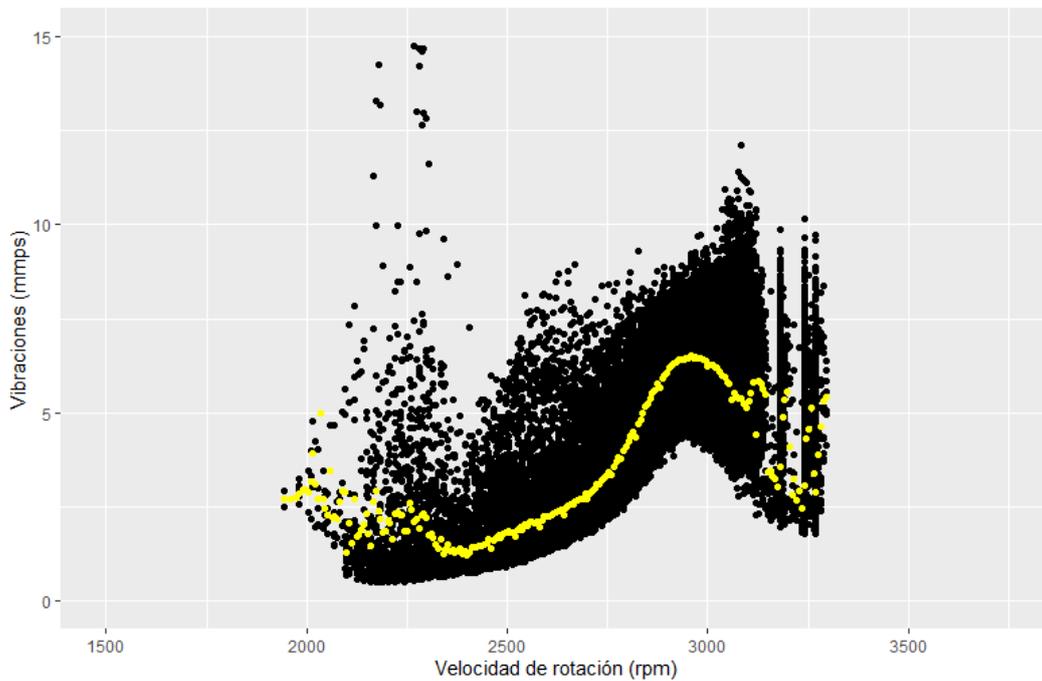


Figura 39. Análisis de las vibraciones del 19 de marzo de 2020 de la turbina T11.

Al ser éste un día de alta generación de potencia, en la figura 39, para la turbina T11, debería detectarse una mayor nube de puntos a partir de las 3000 rpm. En cambio, al tener ésta una cantidad de sal acumulada considerable se muestra un diagrama de dispersión bastante peculiar. Se observa que toda la nube de puntos está concentrada entre las 2000 y las 3250 rpm y además no mantiene su tendencia de valles y picos habitual de cuando trabajaba en buen estado. A partir de las 3000 rpm genera unos descensos y crecimientos abruptos de las vibraciones.

El día 20 y 21 de marzo de 2020 son también interesantes de analizar ya que estos días se activó de manera manual la limpieza con agua dulce de las turbinas (Figuras 30d) y 30e)) y el diagrama de la turbina T11 cambió considerablemente si la comparamos con los anteriores días de marzo analizados hasta el momento.

El 20 de marzo (Figura 30d)) corresponde a un día de generación de potencia media-alta, entorno a los 7 kW, mientras que el 21 de marzo (Figura 30e)) a un día de generación de potencia baja, de menos de 5 kW.

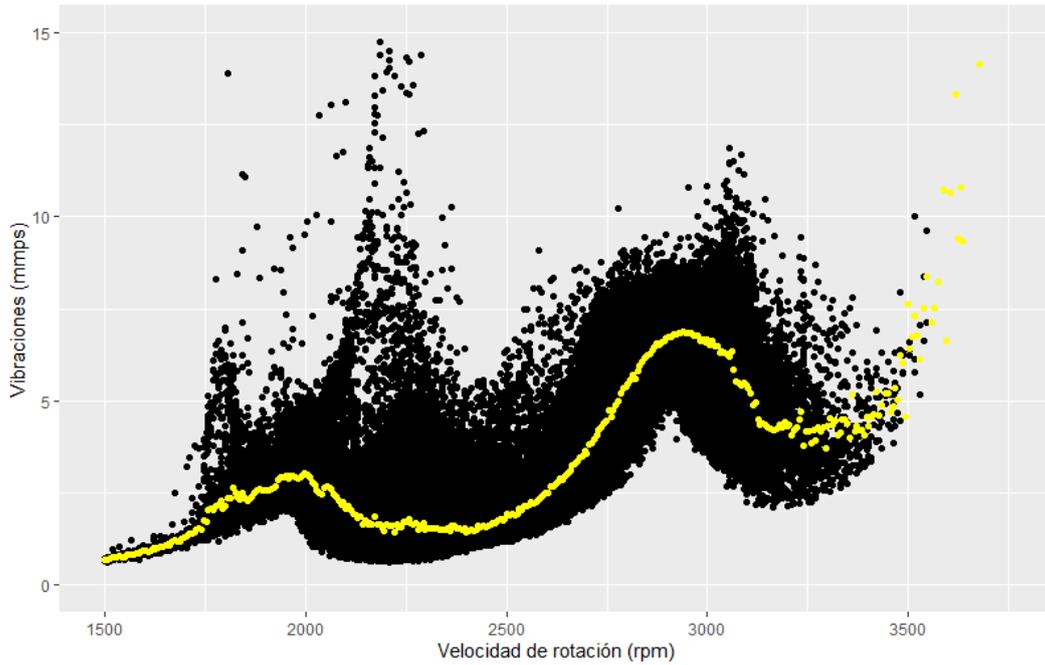


Figura 40. Análisis de las vibraciones del 20 de marzo de 2020 de la turbina T11.

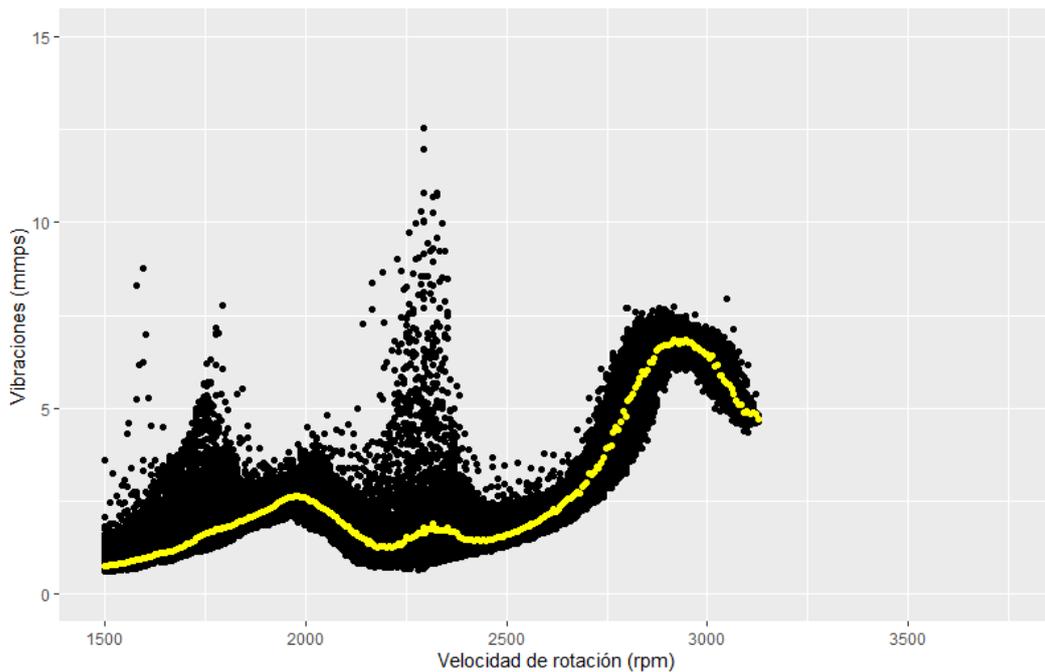


Figura 41. Análisis de las vibraciones del 21 de marzo de 2020 de la turbina T11.

Observando las gráficas de las figuras 40 y 41 para los días 20 y 21 de marzo de 2020, respectivamente, se puede comprobar que tras la activación manual de la limpieza con agua dulce del día 20 de marzo en la turbina T11, ésta vuelve a generar su patrón de puntos habitual y por lo tanto se deduce que las anomalías en los diagramas previos se deben a la acumulación de sal y la falta de limpieza de los álabes.

Para finalizar, se muestra el diagrama de vibraciones correspondiente al 24 de junio de 2020 (Figura 42).

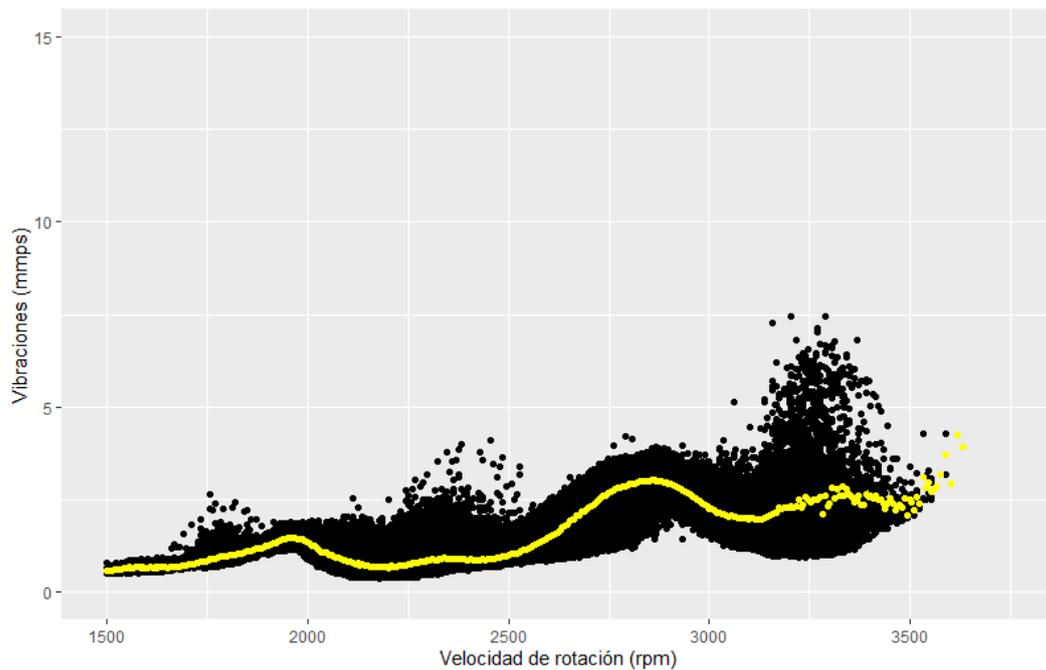


Figura 42. Análisis de las vibraciones del 24 de junio de 2020 de la turbina T11.

Este día de junio fue un día de baja generación de potencia, entorno a los 5 kW (Figura 33b)). Para esta fecha el sistema de limpieza ya había sido arreglado y por lo tanto la turbina T11 muestra una gráfica de dispersión similar a las obtenidas en enero o febrero de 2020 en la que no se observa una gran dispersión de puntos a altas revoluciones (3000 rpm).

Finalmente, al margen de las vibraciones generadas por las acumulaciones de sal en las turbinas T11 y T12 afectadas por el fallo en el sistema de limpieza de agua dulce, se decidió graficar y analizar las vibraciones generadas en la turbina T08 cuyo comportamiento, en lo que a generación de potencia se refiere, pareció empezar a ser anómalo en el mes de junio de 2020. Con el fin de observar el momento en el que el comportamiento de dicha turbina, en lo que a vibraciones se refiere, comenzó a ser extraño, se analizaron las vibraciones a lo largo de los meses de enero, febrero y marzo de 2020 (Figuras 43a-f)).

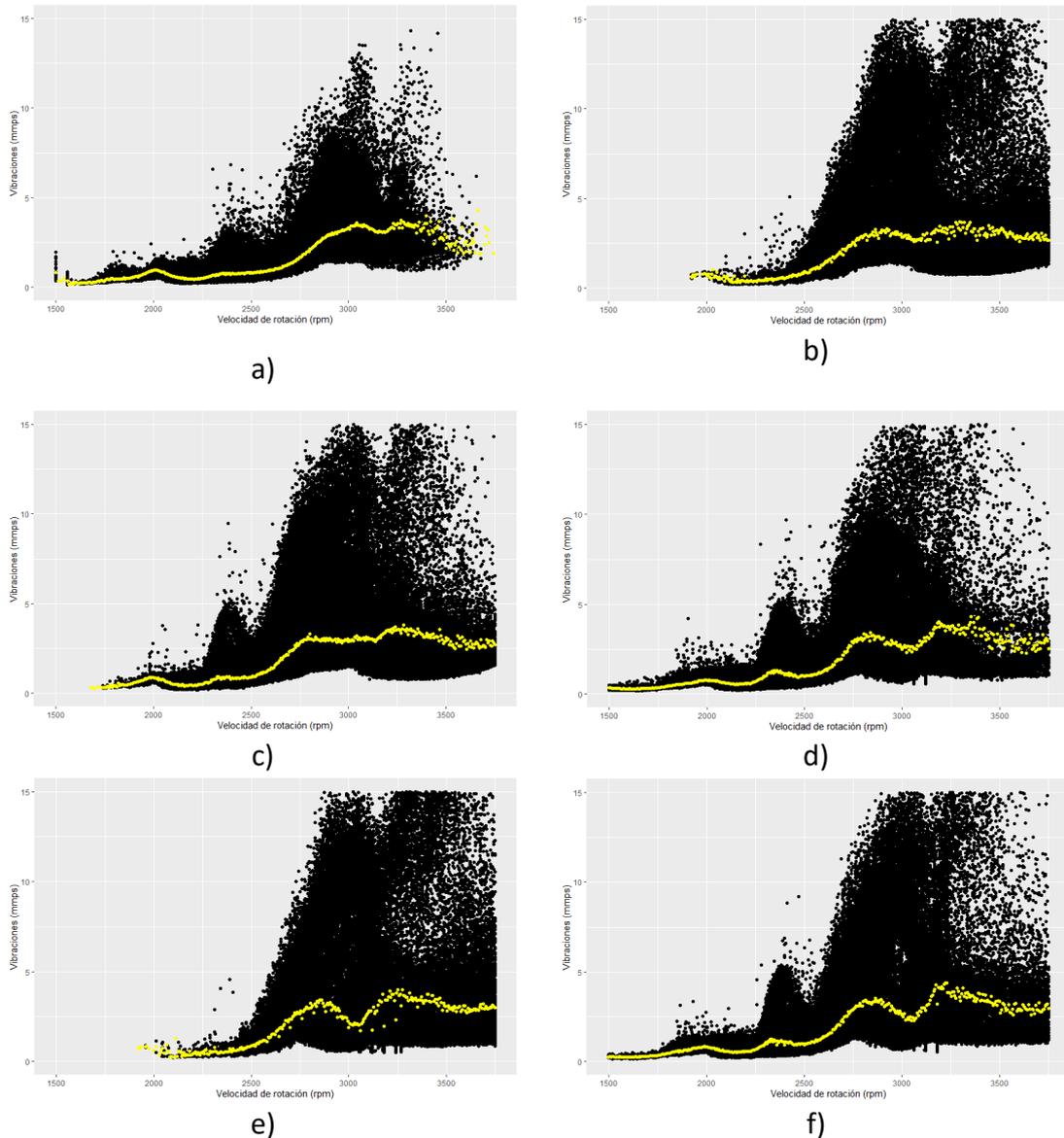


Figura 43. Vibraciones de la turbina T08: 21 enero de 2020 (a); 19 (b) y 21 (c) de febrero de 2020; 18 (d), 19 (e) y 20 (f) de marzo de 2020.

Se puede ver que a lo largo de los días de enero, febrero y marzo de 2020 estudiados, las vibraciones de la turbina T08 son excesivas llegando incluso a salirse del diagrama los días de generación alta como por ejemplo el 19 de marzo de 2020 (Figura 43e)). Esta turbina tuvo que ser parada en junio de 2020 ya que las tapas que sujetan el rodamiento estaban bastante gastadas generando una holgura y en consecuencia un movimiento axial. Esta información se considera bastante valiosa, ya que, si se hubieran analizando a tiempo, se podría haber deducido, ya desde enero de 2020, que la turbina T08 iba a generar algún tipo de problema y en consecuencia se podría haber realizado un mantenimiento preventivo y así conseguir que la turbina no tuviera que estar parada algún día de junio debido al fallo ocurrido.

6. CONCLUSIONES

Tras analizar los resultados mostrados, se puede concluir que el confinamiento domiciliario establecido durante los meses de marzo, abril y mayo de 2020 debido a la pandemia de la COVID-19 influyó en cierta manera en la planta undimotriz de Mutriku. De esta manera, como consecuencia de las restricciones de movilidad impuestas, no se pudo solucionar de manera inmediata el problema asociado al sistema de limpieza de las turbinas.

La falta de un sistema automático de limpieza con agua dulce provocó que se generaran depósitos de sal en las turbinas afectadas, T11 y T12, pudiendo cuantificarse las pérdidas de potencia asociadas mediante el análisis de datos reales.

El estudio de la influencia de estas acumulaciones de sal ha conducido inherentemente al estudio de las vibraciones de dichas turbinas con el que nuevamente se ha podido comprobar que los depósitos de sal generaran vibraciones extras o indeseadas. Estas vibraciones posiblemente son ocasionadas por la distribución irregular del peso de estos depósitos de sal sobre la superficie de los álabes, generando importantes problemas como la pérdida de aerodinamismo o el desgaste de los distintos componentes del sistema turbinas-motor debido a las fuerzas axiales generadas.

Mediante este trabajo de investigación se ha podido concluir que el análisis de vibraciones podría ser utilizado como indicador de un mal funcionamiento de las máquinas para poder descubrir fallos incluso antes de que sucedan y poder realizar así mantenimientos preventivos. Esta teoría ha quedado demostrada al analizar las vibraciones de la turbina T08 que en junio de 2020 tuvo que ser parada para solucionar un problema relacionado con el rodamiento, que, tras el análisis de las vibraciones, se ha podido deducir que era un problema que venía arrastrando ya desde enero de ese mismo año.

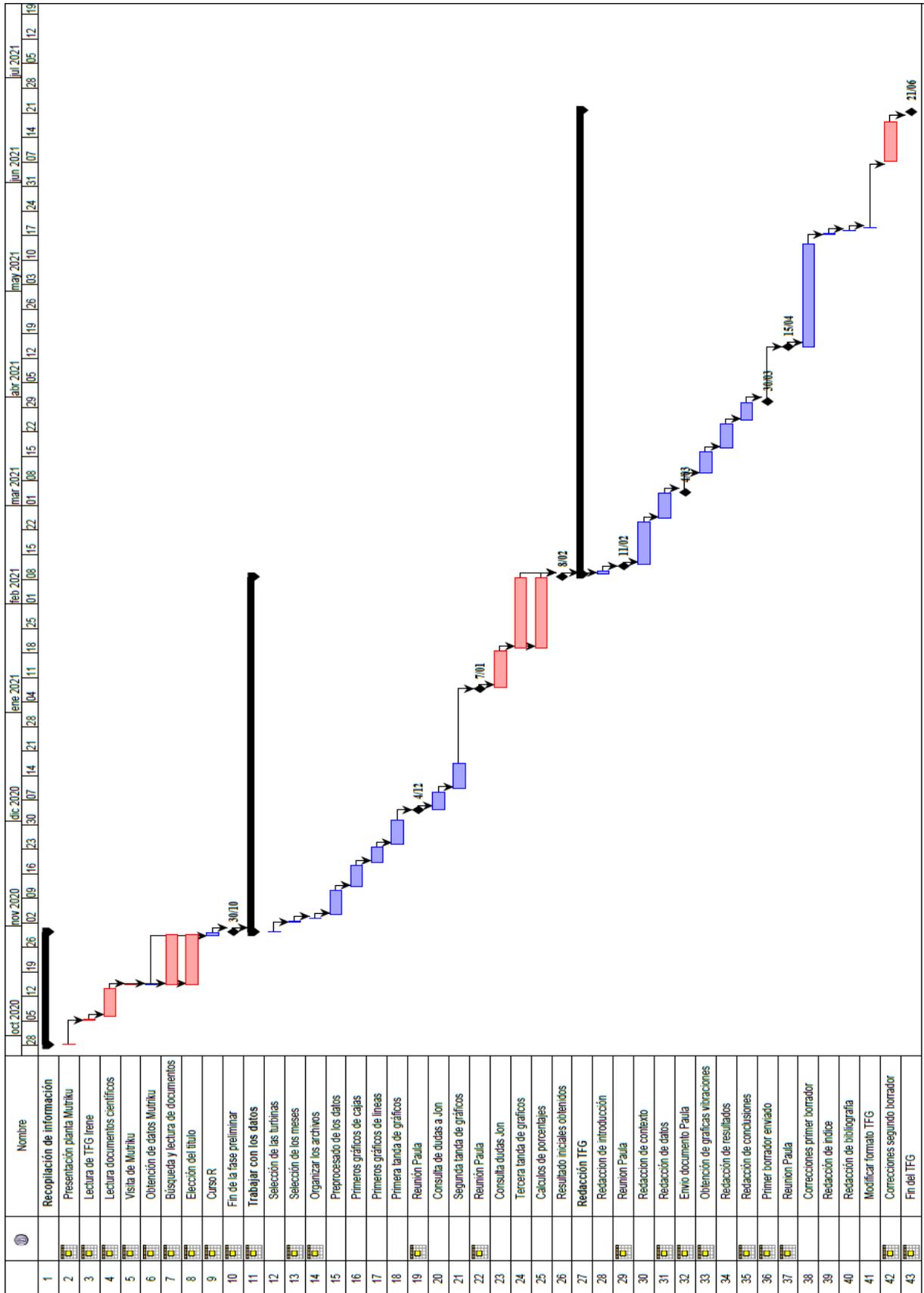
Estas acumulaciones de sal, aparte de influir en la generación de la potencia de las turbinas, también ocasionan daños en el material de los álabes, haciendo que éstos sufran efectos de picadura y fragilización. Estos daños suponen la fatiga y debilitación del material, lo que hace que la vida útil de estas piezas decaiga y tengan que ser

cambiadas o reparadas antes de tiempo debido a una rotura. Es por ello que, aunque el sistema de limpieza con agua dulce de los álabes de las turbinas contribuye al aumento de la potencia generada, y trata de disminuir la corrosión, no es la solución idónea. La sal proveniente del entorno marino sigue siendo un problema que afecta de manera directa al material de los álabes de las turbinas por lo que sería interesante investigar sobre este tema e intentar buscar soluciones que alarguen la vida útil de dichos álabes.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi tutora Paula Serras por guiarme en este proyecto y estar a mi disposición siempre que he necesitado consejo o ayuda. También me gustaría dar las gracias a Jon Lekube, del Ente Vasco de la Energía, tanto por proporcionarnos los datos de las turbinas y los planos utilizados en esta investigación como por su disponibilidad para enseñarnos y explicarnos el funcionamiento de la planta de Mutriku y responder a las dudas que me han ido surgiendo mientras realizaba el TFG.

8. DIAGRAMA DE GANTT



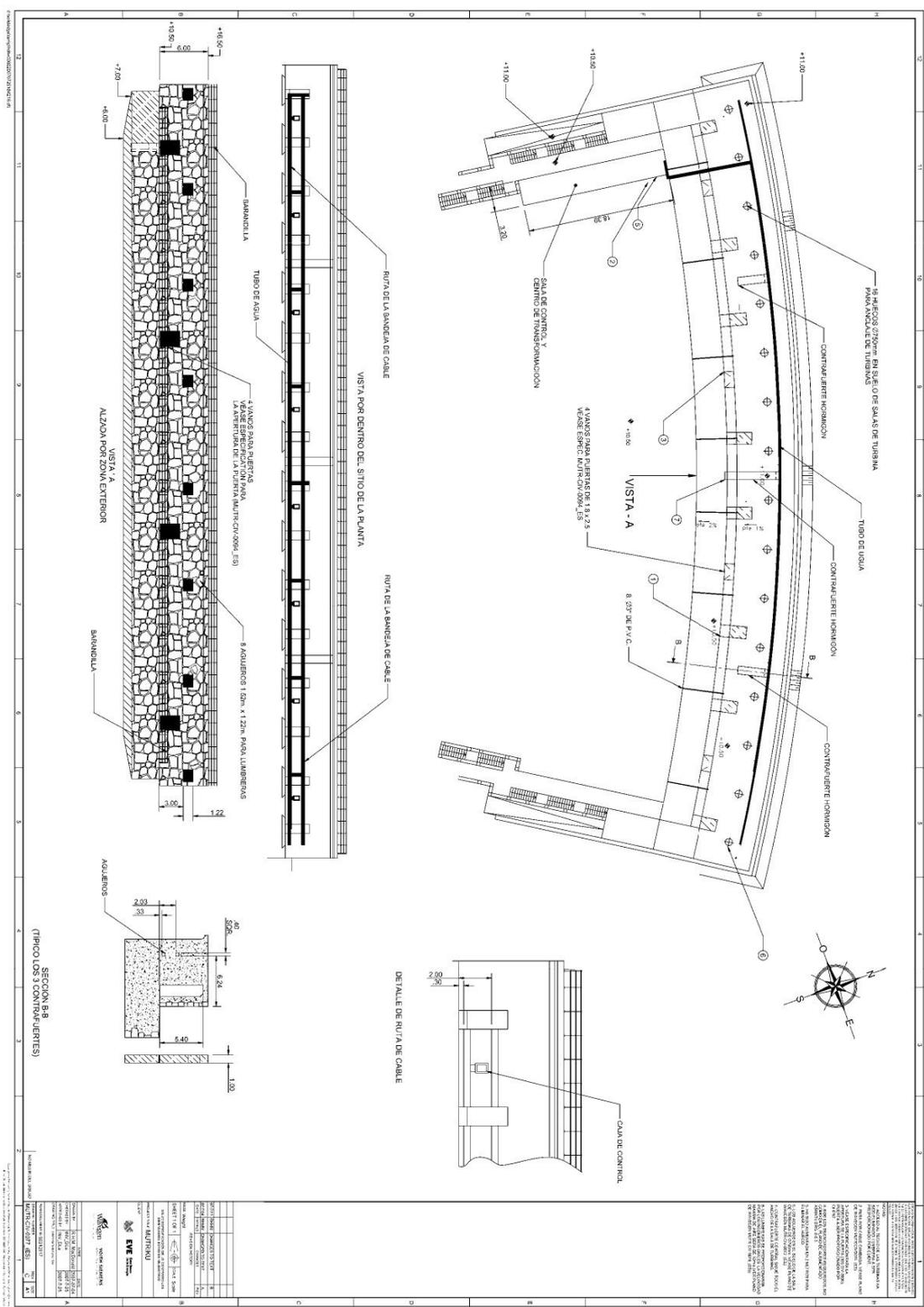
9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agenda2030—Objetivos. (s. f.). Recuperado 29 de junio de 2021, de <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/home.htm>
- [2] ¿Cuáles son los objetivos que se quieren alcanzar en la COP25? (s. f.). Comunidad #PorElClima - Actúa para frenar el cambio climático. Recuperado 6 de febrero de 2021, de <https://porelclima.es/equipo/3161-cuales-son-los-objetivos-que-se-quieren-alcanzar-en-la-cop25>
- [3] Carbon Monitor. (s. f.). Recuperado 6 de febrero de 2021, de <https://carbonmonitor.org/>
- [4] La recuperación sostenible de la pandemia es esencial para cerrar la brecha de emisiones: Informe de la ONU. (2020, septiembre 12). UN Environment. <http://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/la-recuperacion-sostenible-de-la-pandemia-es-esencial>
- [5] IEA, Electricity mix in the European Union, Q1 2020, IEA, Paris de <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-mix-in-the-european-union-q1-2020>
- [6] Shan, Y., Ou, J., Wang, D., Zeng, Z., Zhang, S., Guan, D., & Hubacek, K. (2020). Impacts of COVID-19 and fiscal stimuli on global emissions and the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00977-5>
- [7] 1712_Previsión_de_cierre_2020.pdf». Accedido 6 de febrero de 2021. https://www.ree.es/sites/default/files/1712_Previsión_de_cierre_2020.pdf.
- [8] El mercado de las energías renovables en España: Pasado, presente y futuro. (2020, agosto 10). Hablemos de empresas. <https://hablemosdeempresas.com/empresa/energias-renovables-espana/>
- [9] ¿Cómo se sustentan los aerogeneradores en el mar? (s. f.). Iberdrola. Recuperado 3 de marzo de 2021, de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>

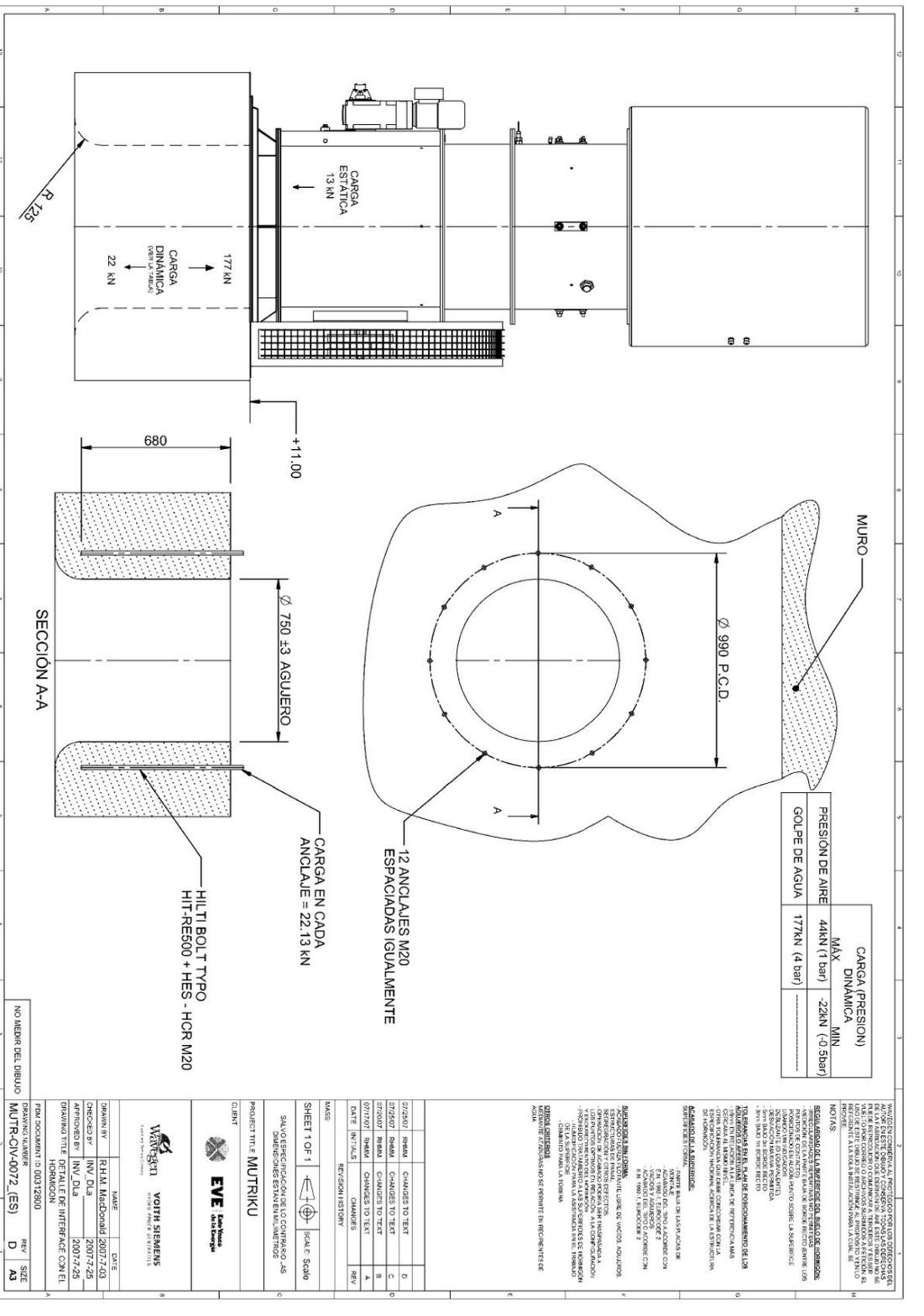
- [10] Redacción. (s. f.). 10 datos más importantes sobre la energía eólica marina | Revista Energía y Negocios. Recuperado 3 de marzo de 2021, de <https://revistaenergiaynegocios.com/2020/10/12/10-datos-mas-importantes-sobre-la-energia-eolica-marina/>
- [11] Marin-Coria, E., Roldan Carvajal, M., Sánchez-Sáenz, C., Enriquez, C., Felix Delgado, A., Silva, R., & Mendoza, E. (2020). Energía del Océano. Potencial del Gradiente Salino. Estado del Arte. <https://doi.org/10.26359/EPOMEX.CEMIE012020>
- [12] Rincón, S. (s. f.). Energía de gradiente salino una solución ecológica. Facultad de Minas | Universidad Nacional de Colombia. Recuperado 3 de marzo de 2021, de <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/606-energia-de-gradiente-salino-una-solucion-ecologica>
- [13] Makai Ocean pone en marcha la mayor planta térmica oceánica del mundo en Hawai. (s. f.). Recuperado 3 de marzo de 2021, de <https://elperiodicodelaenergia.com/makai-ocean-pone-en-marcha-la-mayor-planta-termica-oceanica-del-mundo-en-hawai/>
- [14] Garduño Ruiz, E., García Huante, A., Rodríguez Cueto, Y., Barcenás, J., Mendieta, M., Cerezo, E., Tobal, J., Romero, V., & Silva, R. (2017). Conversión de Energía Térmica Oceánica (otec). Estado del Arte. <https://doi.org/10.26359/EPOMEX.CEMIE012017>
- [15] tiposdeenergiasite. (2016, julio 5). Energía mareotérmica. tiposdeenergiasite. <https://tiposdeenergiasite.wordpress.com/2016/07/05/energia-mareotermica/>
- [16] Posada Vanegas, G., Chávez, V., Hernández-Fontes, J., Rodríguez Cueto, Y., Sánchez, G., Felix Delgado, A., Huerta, R., López-Honorato, E., & Silva, R. (2019). El Futuro de las Energías Marinas en México (In Spanish) (pp. 225-274).
- [17] Hdm. (2016, diciembre 12). Energías Renovables Marinas: Convertidores de mareas y corrientes marinas. Energías Renovables Marinas. <http://energiasrenovablesmarinas.blogspot.com/2016/12/convertidores-de-corrientes-marinas-y.html>

- [18] Wave devices: EMEC: European Marine Energy Centre. (s. f.). Recuperado 3 de marzo de 2021, de <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- [19] CALORYFRIO, I. A. (s. f.). Glosario de términos ambientales y de las energías renovables—Caloryfrio.com. Recuperado 3 de marzo de 2021, de <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/glosario-terminos-ambientales-energias-renovables.html>
- [20] La planta de energía de las olas de Mutriku bate un nuevo record de producción al generar 2 GWh BiMEP. (s. f.). Recuperado 8 de febrero de 2021, de <https://www.bimep.com/la-planta-de-energia-de-las-olas-de-mutriku-bate-un-nuevo-record-de-produccion-al-generar-2-gwh/>
- [21] Soria. (2011, febrero 5). MOTRICO. El Blog de Elena Eizaguirre. <https://pasandolatarde.wordpress.com/2011/02/05/motrico/>
- [22] Puerto de Mutriku. (s. f.). Mutrikuko Udala. Recuperado 20 de febrero de 2021, de <https://www.mutriku.eus/es/turismo/mutriku/puerto>
- [23] Arcelay Fernández-Meras, I. (2020). Análisis y comparativa de los parámetros de operación de las turbinas de la planta undimotriz de Mutriku en el periodo 2018-2019. <https://doi.org/10/47004>
- [24] Torre-Enciso, Y., & Ortubia, I. (s. f.). Mutriku Wave Power Plant: From the thinking out to the reality. 11.
- [25] Mutriku estrena la primera planta precomercial de energía undimotriz. (2011, julio 7). Desenchufados. <https://desenchufados.net/mutriku-estrena-la-primera-planta-precomercial-de-energia-undimotriz/>
- [26] Optimización del perfil de álabes de una turbina radial. (s. f.). Recuperado 21 de febrero de 2021, de https://documen.site/download/optimizacion-del-perfil-de-alabe-de-una-turbina-radial-para-el_pdf
- [27] Monpex aluminio 5083. (s. f.). Recuperado 2 de marzo de 2021, de <https://monpex.com/wp-content/uploads/GrupoMonpex-AleacionAluminio5083.pdf>

- [28] Núñez, J. M. M. (s. f.). Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes. 77.
- [29] Lekube, J., Ajuria, O., Ibeas, M., Igareta, I., & Gonzalez, A. (2018). Fatigue and Aerodynamic Loss in Wells Turbines: Mutriku Wave Power Plant Case. 7.
- [30] Zataráin, I. de J. G., & del Ángel, F. C. (2008). Resistencia mecánica en aleaciones de aluminio estructural expuestas a corrosión marina (Parte I: Materiales ferrosos). Científica, 12(1), 39-49.



<p>PROYECTO: ESTACION DE CABLE PARA LA ZONA EXTERIOR DE LA CIUDAD DE LA PAZ</p> <p>FECHA: 15/03/2011</p> <p>ESCALA: 1:50</p>	
<p>CLIENTE: MUNICIPALIDAD DE LA PAZ</p> <p>DISEÑO: INGENIERIA CIVIL</p> <p>CONSTRUCCION: INGENIERIA CIVIL</p>	<p>PROYECTISTA: INGENIERIA CIVIL</p> <p>REVISOR: INGENIERIA CIVIL</p> <p>APROBADO: INGENIERIA CIVIL</p>
<p>PROYECTO: ESTACION DE CABLE PARA LA ZONA EXTERIOR DE LA CIUDAD DE LA PAZ</p> <p>FECHA: 15/03/2011</p> <p>ESCALA: 1:50</p>	<p>CLIENTE: MUNICIPALIDAD DE LA PAZ</p> <p>DISEÑO: INGENIERIA CIVIL</p> <p>CONSTRUCCION: INGENIERIA CIVIL</p>



10.2 CÓDIGO R DE PREPROCESADO DE DATOS

#Ingreso de datos

```
delete.na <- function(DF, n=0) {
DF[rowSums(is.na(DF)) <= n,]}
setwd("F:/TFG/Datos/T07/5.T07-ene/")
inputpath <- ("F:/TFG/Datos/T07/5.T07-ene/")
myfiles <- list.files(pattern="*.csv", full.names=TRUE)
T07_Ene2019 <- lapply(myfiles, read.delim, sep="\t")
T07_Ene2019_uni <- do.call(rbind,T07_Ene2019)
```

#Limpieza de columnas de NA puras

```
library(janitor)
T07_Ene2019_uni <- remove_empty(T07_Ene2019_uni,which = "cols")
#Limpieza de Automatic !=10
T07_Ene2019_uni[, 'T07_AUTOMATIC'][T07_Ene2019_uni[, 'T07_AUTOMATIC']!=10 &
T07_Ene2019_uni[, 'T07_AUTOMATIC']!=9] <- NA
T07_Ene2019_uni <- delete.na(T07_Ene2019_uni)
```

#Limpieza de healthy !=1

```
T07_Ene2019_uni[, "T07_DriveHealthy"][T07_Ene2019_uni[, "T07_DriveHealthy"]!=1] <- NA
T07_Ene2019_uni <- delete.na(T07_Ene2019_uni)
#Limpieza filas con NA
T07_Ene2019_uni <- delete.na(T07_Ene2019_uni)
```

#Limpieza de potencias no generadas

```
T07_Ene2019_uni[, "T07_Power_kW"][T07_Ene2019_uni[, "T07_Power_kW"]>=0] <- NA
T07_Ene2019_uni <- delete.na(T07_Ene2019_uni)
T07_Ene2019_uni$T07_Power_kW<-T07_Ene2019_uni$T07_Power_kW *(-1)
```

#Eliminar fechas duplicadas (cada día a las 0:00:00,00)

```
library(dplyr)
T07_Ene2019_uni <- distinct(T07_Ene2019_uni)
```

#Limpieza de datos no necesarios

```
T07_Ene2019_uni[,
c("T07_ActiveCurrent_A", "T07_AvPower1min_W", "T07_AvPower5min_W", "T07_OuputVoltage_V", "T07_OutputFrequency_Hz", "T07_ReactiveCurrent_A")]<-NA
T07_Ene2019_uni <- remove_empty(T07_Ene2019_uni,which = "cols")
```

#Limpieza de fechas de febrero añadidas

```
T07_Ene2019_uni['Date'][T07_Ene2019_uni['Date']=='01/02/2020']<-NA
T07_Ene2019_uni['Date'][T07_Ene2019_uni['Date']=='02/02/2020']<-NA
T07_Ene2019_uni <- delete.na(T07_Ene2019_uni)
```

10.3 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE CAJAS GENERAL

#Misma longitud

```
n <- max(length(T07_Ene2019_uni$T07_Power_kW),
length(T08_Ene2019_uni$T08_Power_kW),length(T09_Ene2019_uni$T09_Power_kW),length(
T10_Ene2019_uni$T10_Power_kW),length(T11_Ene2019_uni$T11_Power_kW),length(T12_Ene2019_uni$T12_Power_kW),length(T13_Ene2019_uni$T13_Power_kW))
T07 <- T07_Ene2019_uni$T07_Power_kW
T08 <- T08_Ene2019_uni$T08_Power_kW
T09 <- T09_Ene2019_uni$T09_Power_kW
T10 <- T10_Ene2019_uni$T10_Power_kW
T11 <- T11_Ene2019_uni$T11_Power_kW
T12 <- T12_Ene2019_uni$T12_Power_kW
T13 <- T13_Ene2019_uni$T13_Power_kW
length(T07) <-n
length(T08) <-n
length(T09) <-n
length(T10) <-n
length(T11) <-n
length(T12) <-n
length(T13) <-n
```

#Creacion del dataframe de potencia

```
Potencia_Ene <- cbind(T07,T08,T09,T10,T11,T12,T13)
```

#Graficar potencia

```
boxplot(Potencia_Ene, main = "Potencia generada Enero", xlab = "Meses", ylab =
"Potencia(Kw)")
```

10.4 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE CAJAS DOS TURBINAS

#Misma longitud

```
n <- max(length(T07_Ene2019_uni$T07_Power_kW),
length(T11_Ene2019_uni$T11_Power_kW))
T07 <- T07_Ene2019_uni$T07_Power_kW
T11 <- T11_Ene2019_uni$T11_Power_kW
length(T07) <- n
length(T11) <- n
```

#Creacion del dataframe de potencia

```
Potencia_Abr <- cbind(T07,T11)
```

#Graficar potencia

```
Graph <- boxplot(Potencia_Abr, main = "Potencia generada Abril", xlab = "Turbinas", ylab =
"Potencia(Kw)")
```

#Datos numéricos

```
summary(T07)
summary(T11)
```

10.5 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE LINEAS

#Ingreso de datos

```
T07 <- T07_Ene2019_uni
```

```
T08 <- T08_Ene2019_uni
```

```
T11 <- T11_Ene2019_uni
```

```
T12 <- T12_Ene2019_uni
```

#Juntar columnas tiempo + fecha y pasarlo a formato de tiempo

```
T07$Date <- paste(T07$Date,T07$Time)
```

```
T07$Time <- NULL
```

```
colnames(T07)[colnames(T07) == 'Date'] <- 'Date_Time'
```

```
T07$Date_Time<-as.POSIXct(T07$Date_Time, format="%d/%m/%Y %H:%M:%S")
```

```
T08$Date <- paste(T08$Date,T08$Time)
```

```
T08$Time <- NULL
```

```
colnames(T08)[colnames(T08) == 'Date'] <- 'Date_Time'
```

```
T08$Date_Time<-as.POSIXct(T08$Date_Time, format="%d/%m/%Y %H:%M:%S")
```

```
T11$Date <- paste(T11$Date,T11$Time)
```

```
T11$Time <- NULL
```

```
colnames(T11)[colnames(T11) == 'Date'] <- 'Date_Time'
```

```
T11$Date_Time<-as.POSIXct(T11$Date_Time, format="%d/%m/%Y %H:%M:%S")
```

```
T12$Date <- paste(T12$Date,T12$Time)
```

```
T12$Time <- NULL
```

```
colnames(T12)[colnames(T12) == 'Date'] <- 'Date_Time'
```

```
T12$Date_Time<-as.POSIXct(T12$Date_Time, format="%d/%m/%Y %H:%M:%S")
```

#Medias de 30 minutos

```
T07$by30 = cut(T07$Date_Time, breaks="30 min")
```

```
Potencia07 = aggregate(T07_Power_kW ~ by30, FUN=mean, data=T07)
```

```
T08$by30 = cut(T08$Date_Time, breaks="30 min")
```

```
Potencia08 = aggregate(T08_Power_kW ~ by30, FUN=mean, data=T08)
```

```
T11$by30 = cut(T11$Date_Time, breaks="30 min")
```

```
Potencia11 = aggregate(T11_Power_kW ~ by30, FUN=mean, data=T11)
```

```
T12$by30 = cut(T12$Date_Time, breaks="30 min")
```

```
Potencia12 = aggregate(T12_Power_kW ~ by30, FUN=mean, data=T12)
```

#Unimos fechas en común

```
Potencia <- Reduce(merge,list(Potencia07,Potencia08,Potencia11))
```

#Selección de día

```
library(dplyr)
```

```
d <- which(grepl('2020-01-26', Potencia$by30))
```

```
grafica <- Potencia[d,]
```

#Graficar datos

```
colnames(grafica)[1] <- 'Time'  
colnames(grafica)[2] <- 'Pot_T07'  
colnames(grafica)[3] <- 'Pot_T08'  
colnames(grafica)[4] <- 'Pot_T11'  
library(plotly)  
x <- grafica$Time  
y1 <- grafica$Pot_T07  
y2 <- grafica$Pot_T08  
y3 <- grafica$Pot_T11  
xas='Time'  
yas='Pot'  
plot_ly(x = x) %>%  
  add_lines(y = y1, color = I("red"),line = list(dash = "dash"), name = "T07",title = "x Axis") %>%  
  add_lines(y = y2, color = I(" dark green"),line = list(dash= "dot"), name = "T08") %>%  
  add_lines(y = y3, color = I("blue"),line = list(dash= "solid"), name = "T11") %>%  
  layout( xaxis = list(title="Tiempo"),  
         yaxis = list(title="Potencia(kW)",range = c(0,20)))
```

10.6 CÓDIGO R DE DIAGRAMA DE DISPERSIÓN PARA LAS VIBRACIONES

#Ingreso de datos

```
T11 <- T11_Jun2019_uni
```

#Juntar columnas tiempo + fecha y pasarlo a formato de tiempo

```
T11$Date <- paste(T11$Date,T11$Time)
```

```
T11$Time <- NULL
```

```
colnames(T11)[colnames(T11) == 'Date'] <- 'Date_Time'
```

```
T11$Date_Time <- as.POSIXct(T11$Date_Time, format="%d/%m/%Y %H:%M:%S")
```

#Generar dataframe vibraciones

```
Vibraciones11 <- data.frame(Date_Time=T11$Date_Time,
```

```
T11_Vibration_mmmps=T11$T11_Vibration_mmmps,T11_Motor_rpm=T11$T11_Motor_rpm)
```

```
Vibraciones11$Date <- as.Date((Vibraciones11$Date_Time),format="%d/%m/%Y")
```

```
Vibraciones11$Time <- format(as.POSIXct(Vibraciones11$Date_Time), format = "%H:%M:%S")
```

```
Vibraciones11$Date_Time <- NULL
```

```
Vibraciones11 <- Vibraciones11[c("Date", "Time", "T11_Vibration_mmmps", 'T11_Motor_rpm')]
```

```
Vibraciones11$Date <- as.Date(Vibraciones11$Date)
```

#Selección de día

```
library(dplyr)
```

```
grafica11 <- filter(Vibraciones11,Date == "2020-02-21")
```

#Editar nombre columnas

```
colnames(grafica11)[3] <- 'Vib_T11'
```

```
colnames(grafica11)[4] <- 'Rot_T11'
```

#Graficar datos

```
library(plotly)
```

```
x0 <- grafica11$Rot_T11
```

```
y0 <- grafica11$Vib_T11
```

```
ggplot(grafica11, aes(x=x0, y=y0)) +
```

```
  geom_point(colour = l('Black'))+stat_summary(geom = "point", fun = "mean",colour =  
"yellow")+ xlim(1500,3750)+ylim(0,15)+
```

```
  ggtitle("Vibraciones 21 Febrero T11") +
```

```
  xlab("Velocidad de rotación (rpm)") + ylab("Vibraciones (mmmps)")
```

10.7 GRÁFICAS EXTRA DE ENERO DE 2020

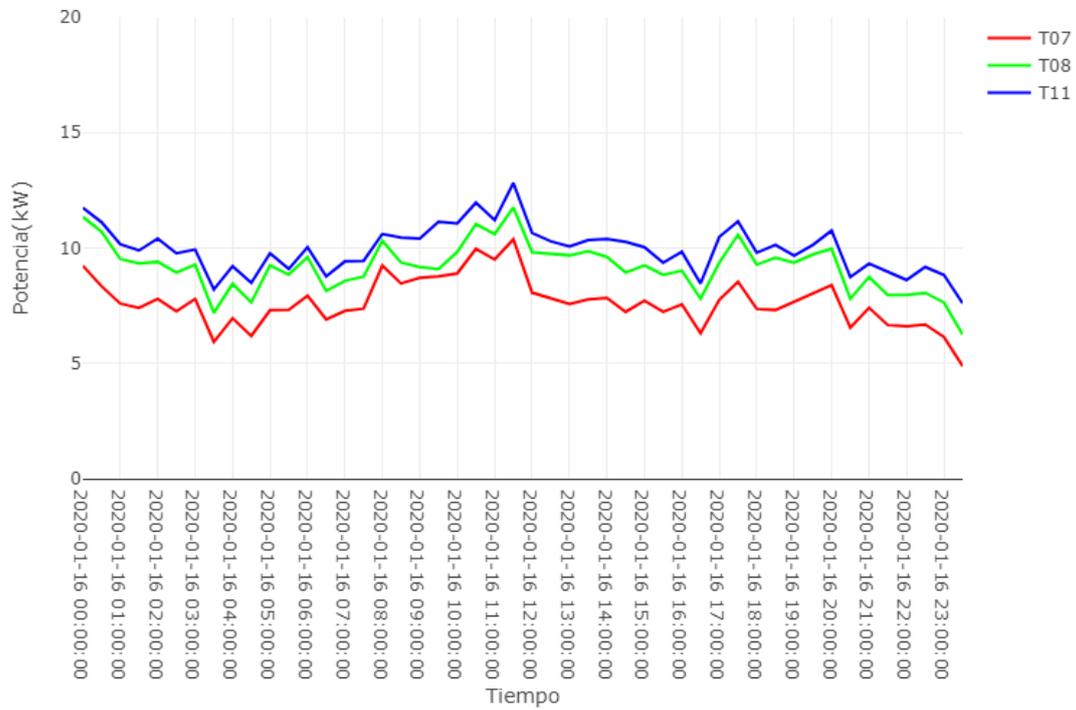


Figura 44. Gráfica del 16 de enero de 2020.

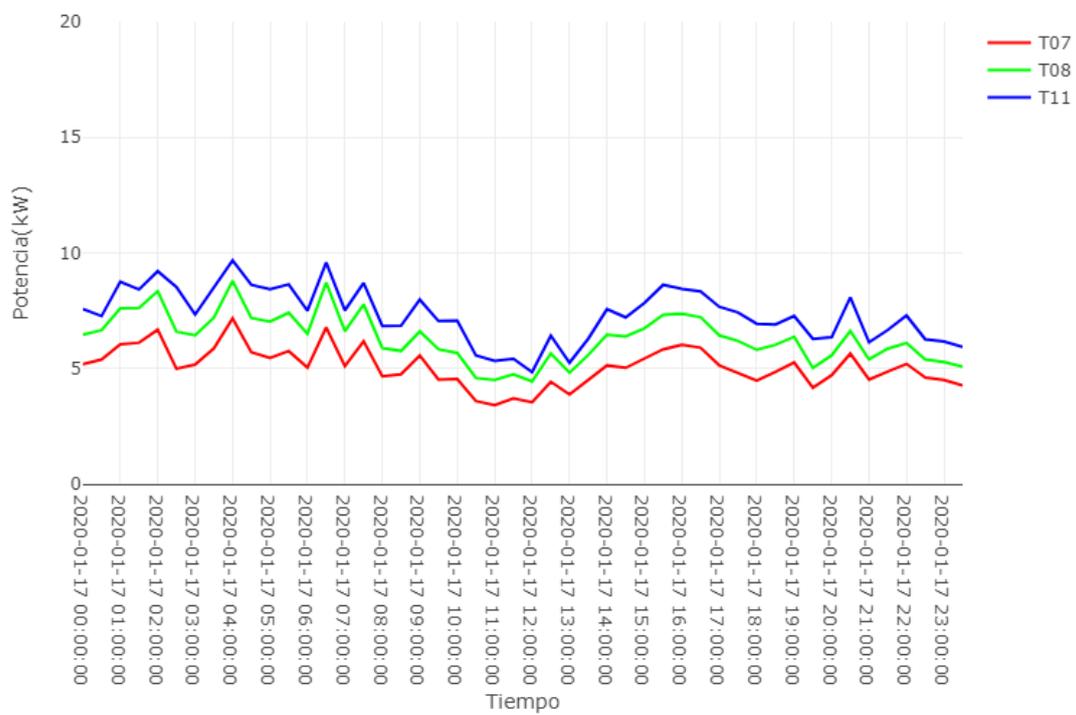


Figura 45. Gráfica del 17 de enero de 2020.

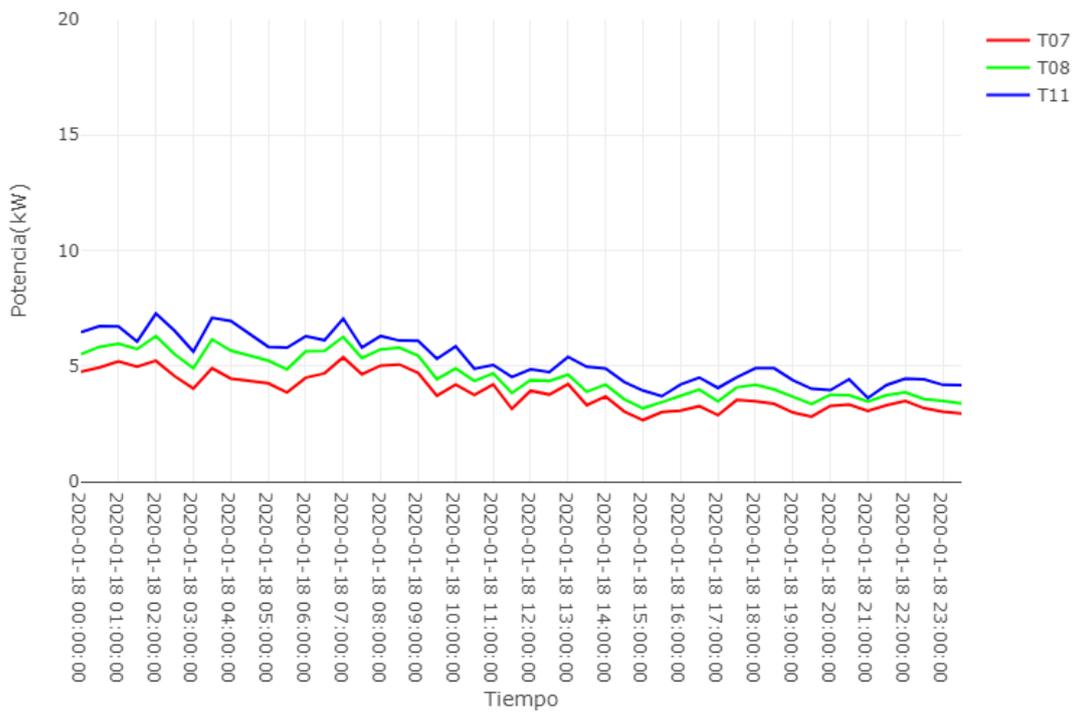


Figura 46. Gráfica del 18 de enero de 2020.

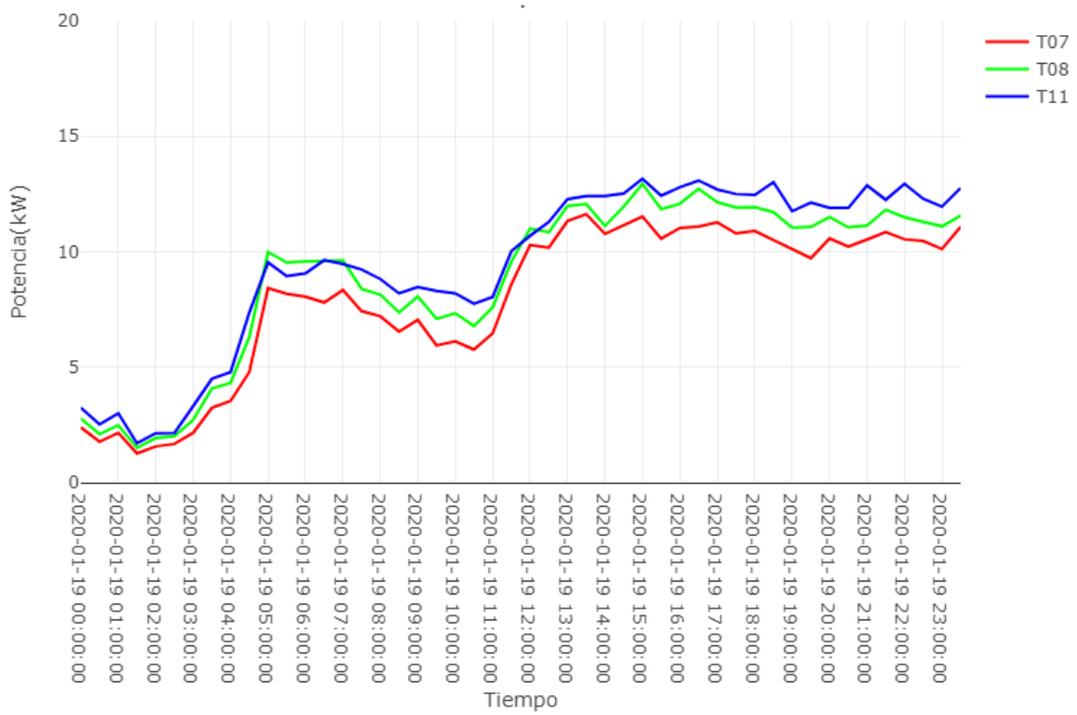


Figura 47. Gráfica del 19 de enero de 2020.

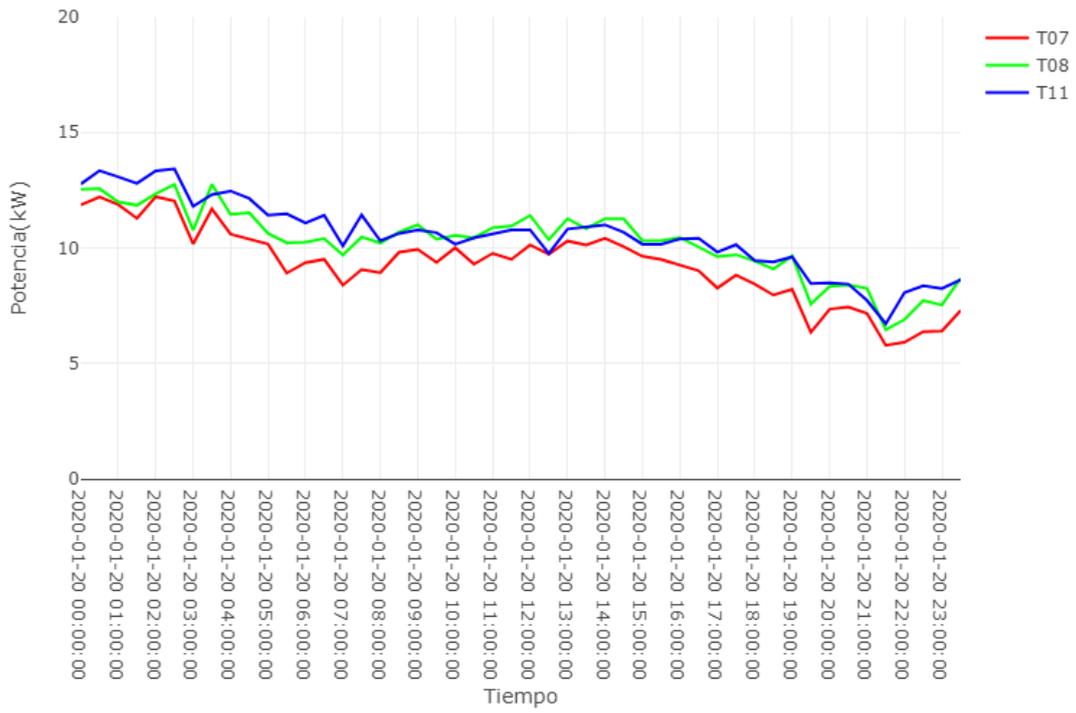


Figura 48. Gráfica del 20 de enero de 2020.

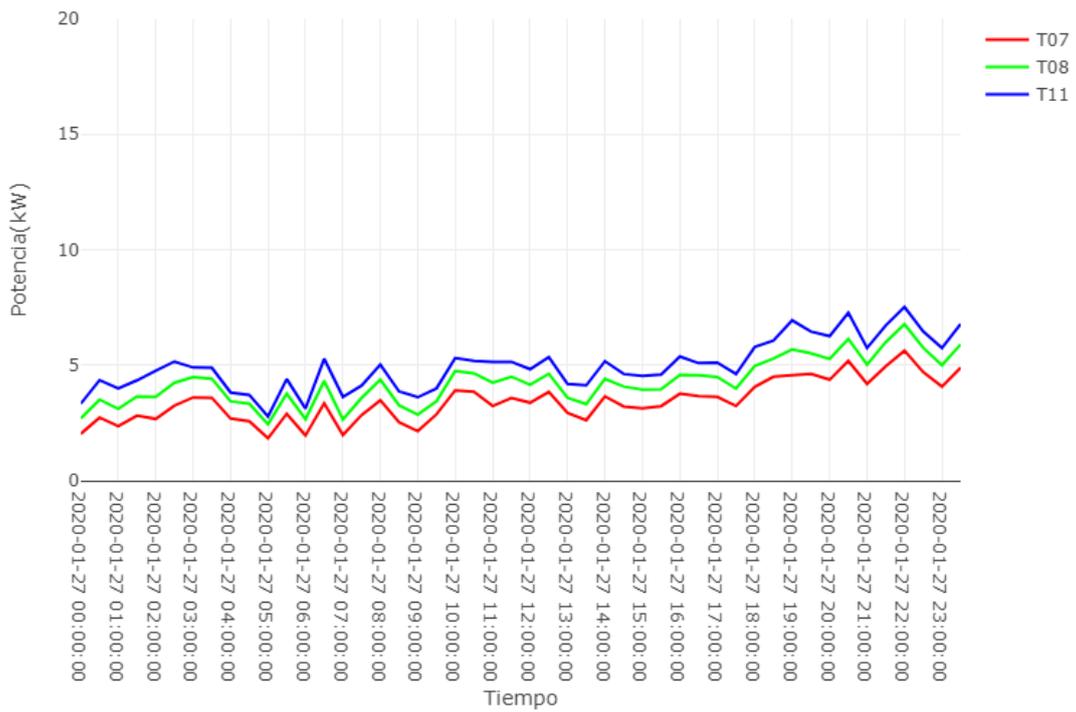


Figura 49. Gráfica del 27 de enero de 2020.

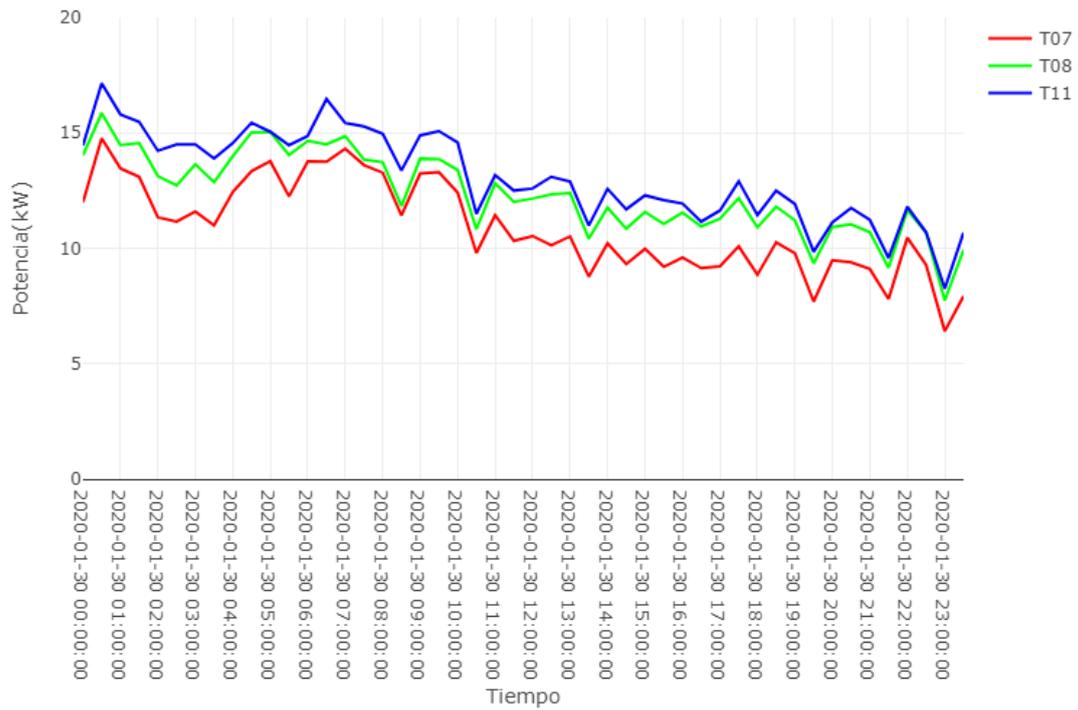


Figura 50. Gráfica del 30 de enero de 2020.

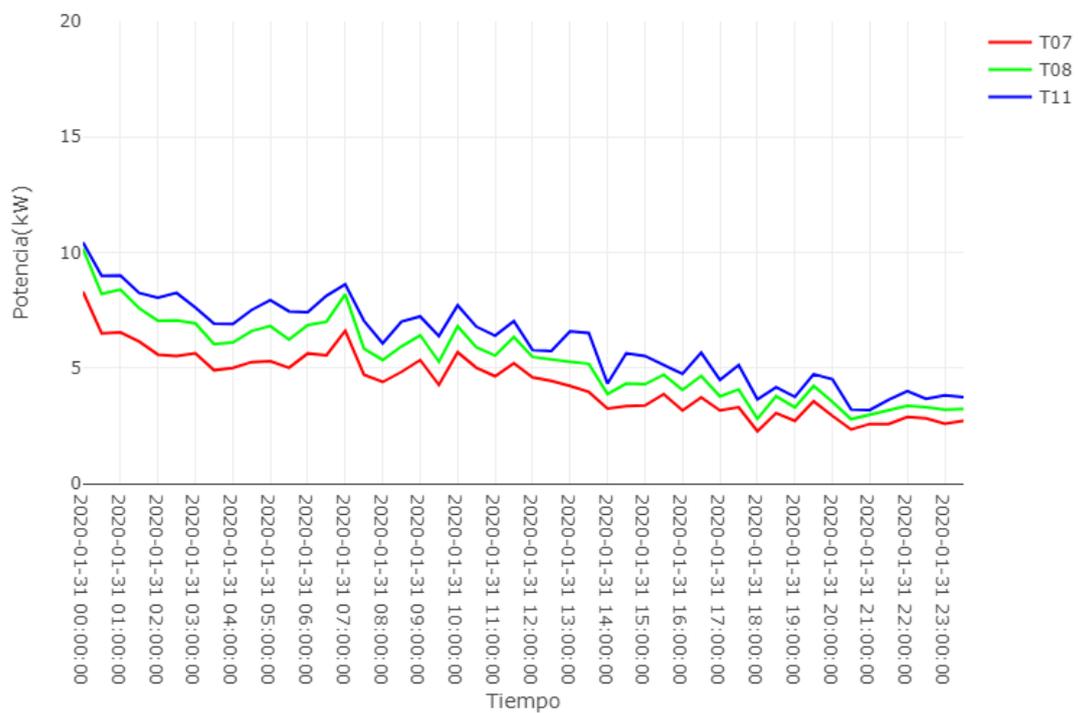


Figura 51. Gráfica del 31 de enero de 2020.

10.8 GRÁFICAS EXTRA DE FEBRERO DE 2020

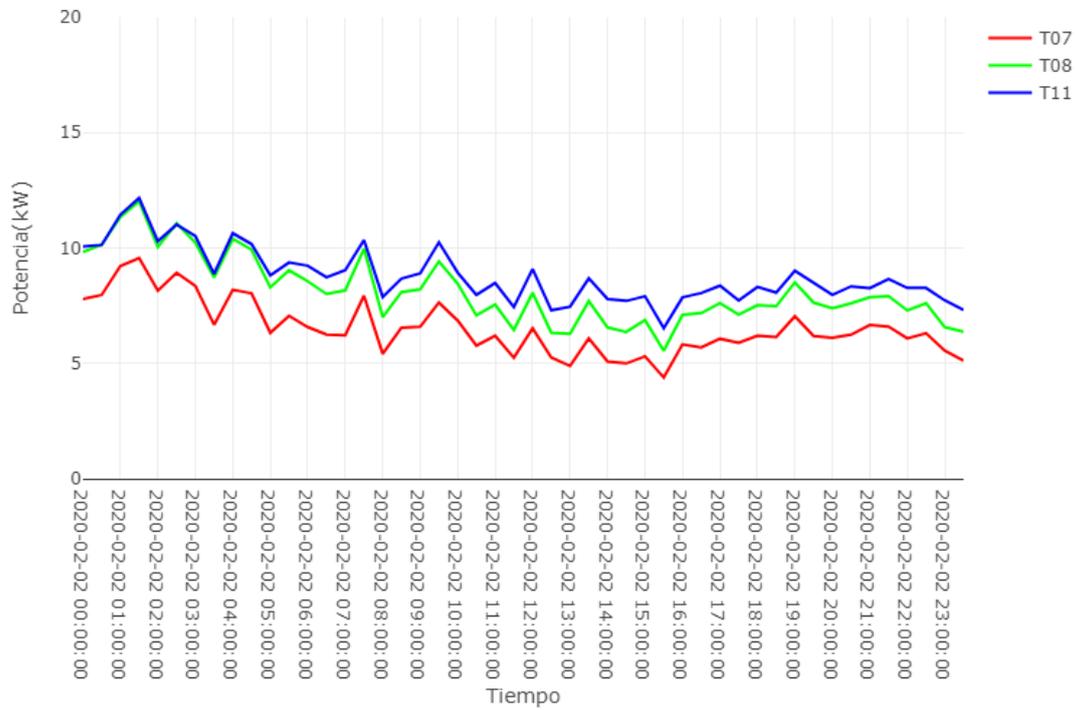


Figura 52. Gráfica del 2 de febrero de 2020.

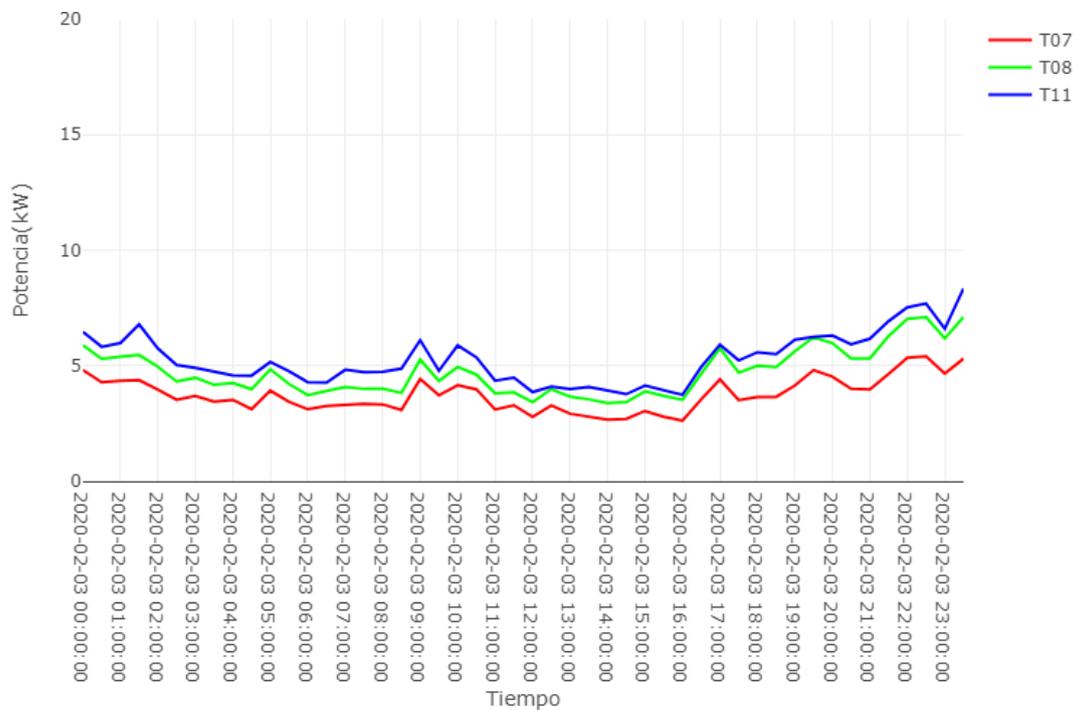


Figura 53. Gráfica del 3 de febrero de 2020.

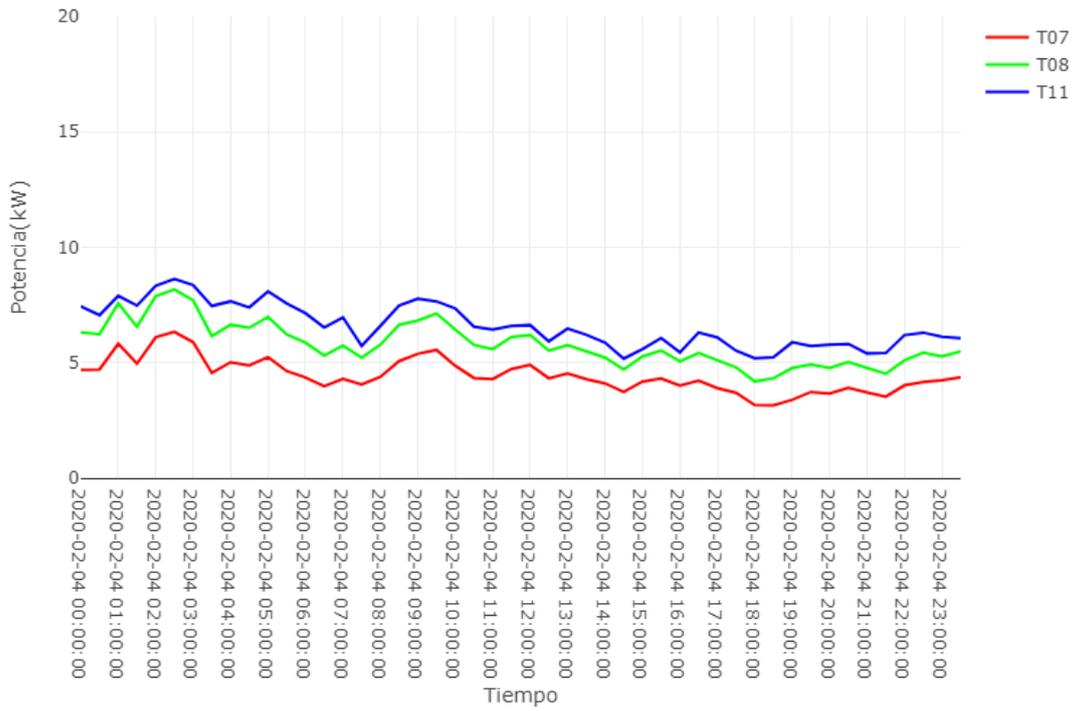


Figura 54. Gráfica del 4 de febrero de 2020.

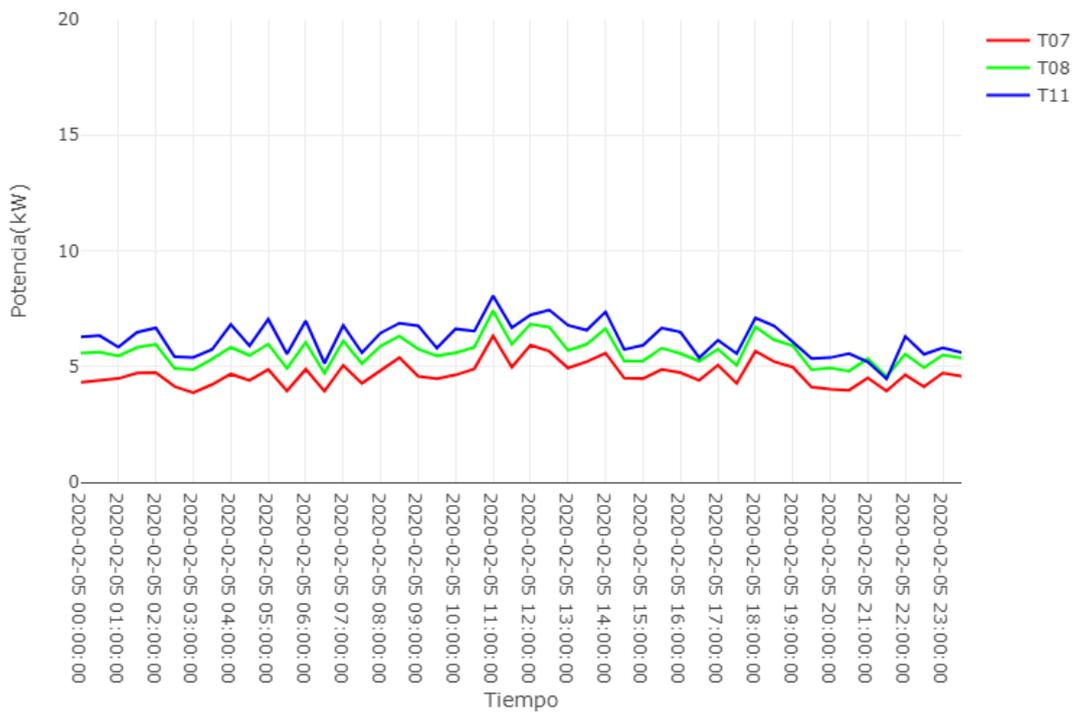


Figura 55. Gráfica del 5 de febrero de 2020.

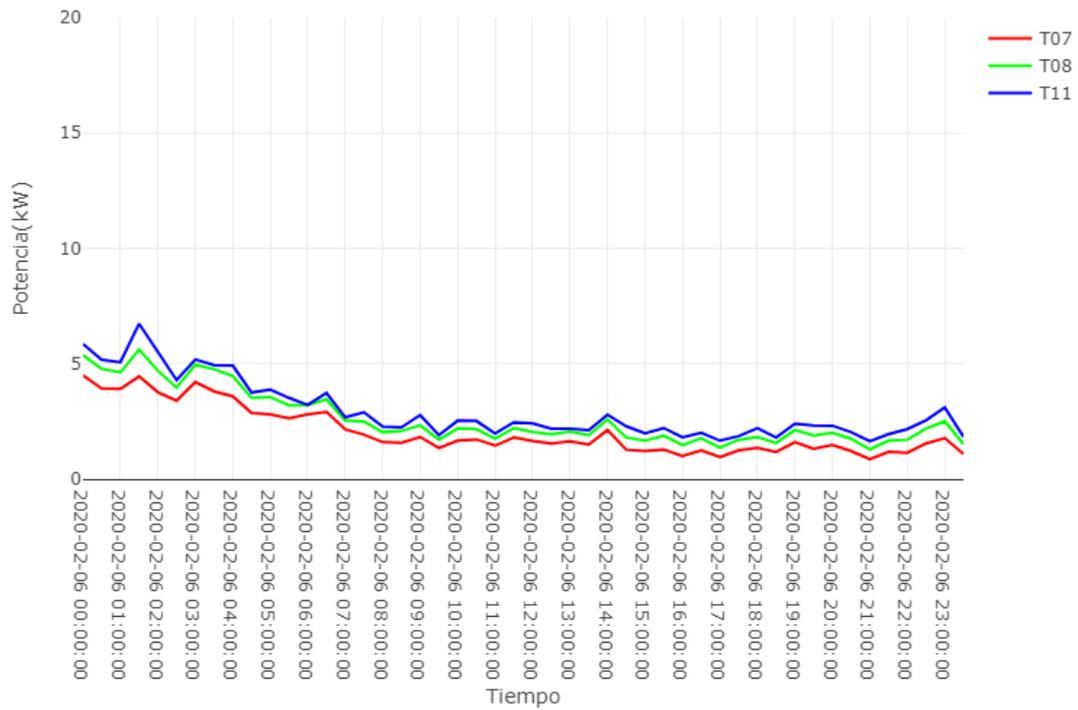


Figura 56. Gráfica del 6 de febrero de 2020.

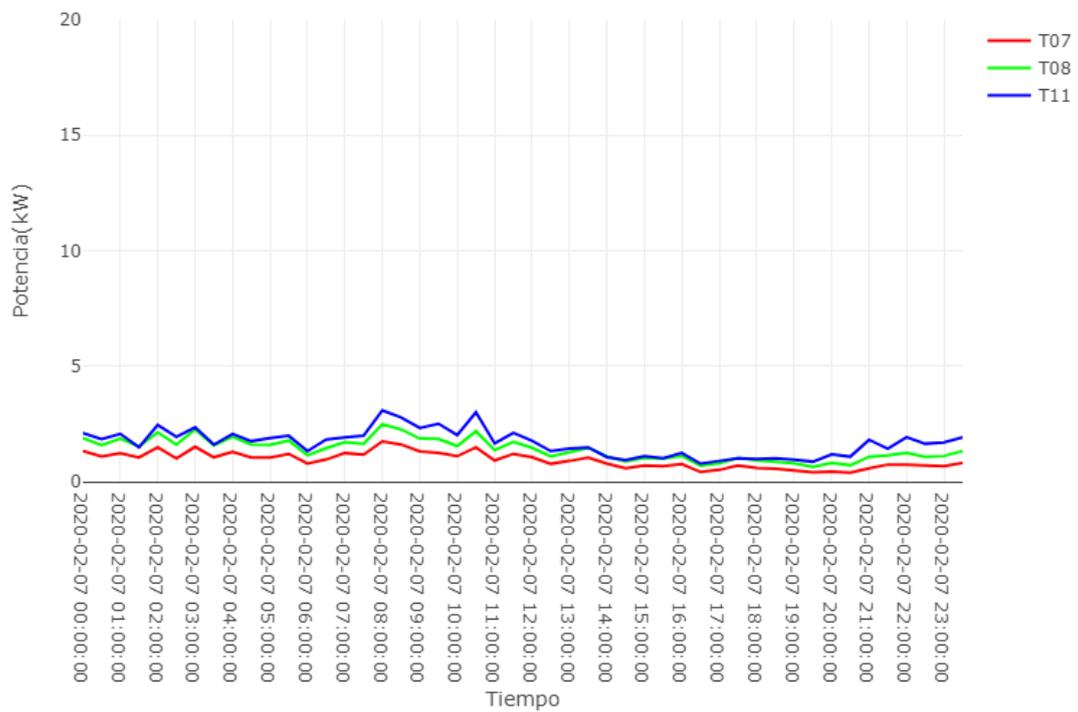


Figura 57. Gráfica del 7 de febrero de 2020.

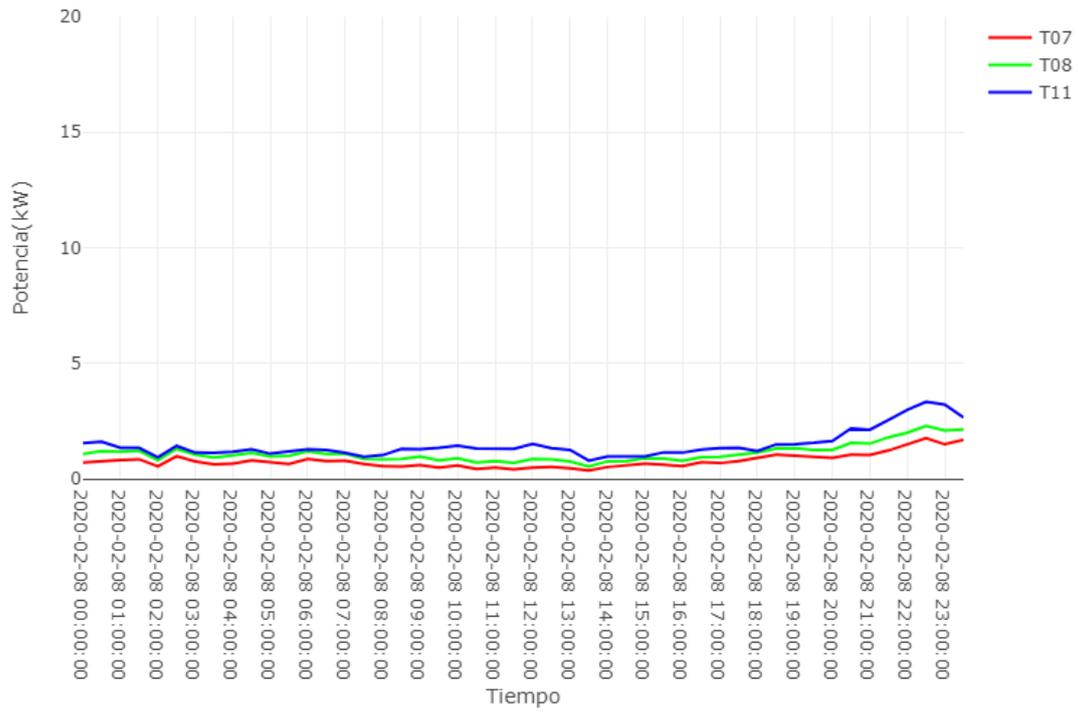


Figura 58. Gráfica del 8 de febrero de 2020.

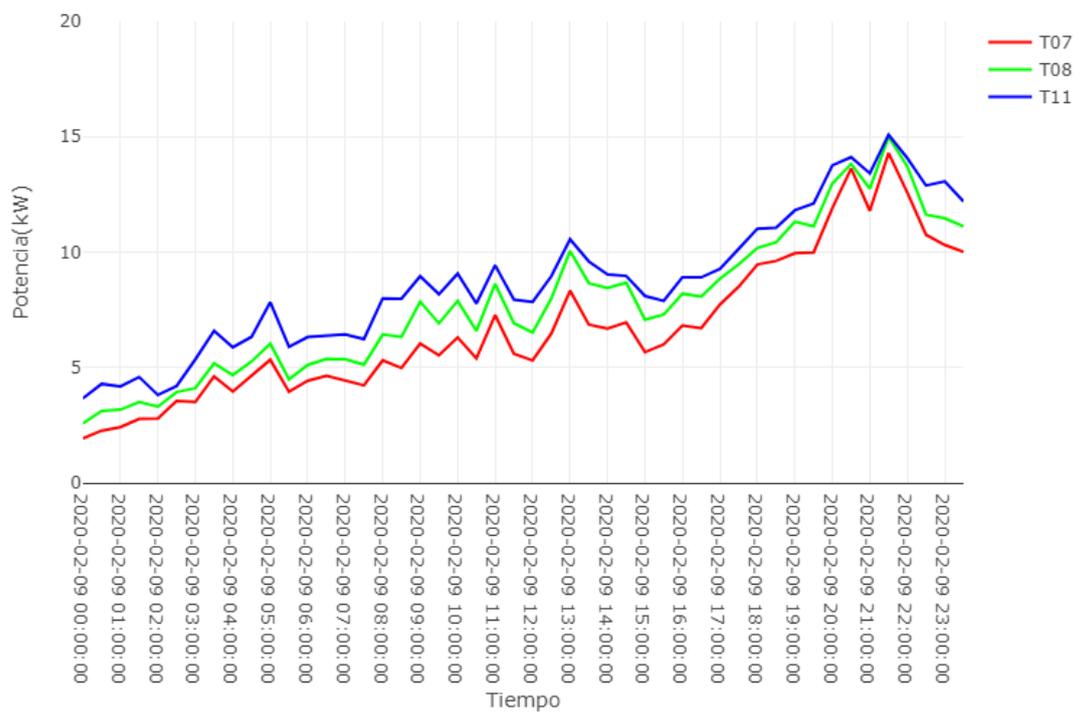


Figura 59. Gráfica del 9 de febrero de 2020.

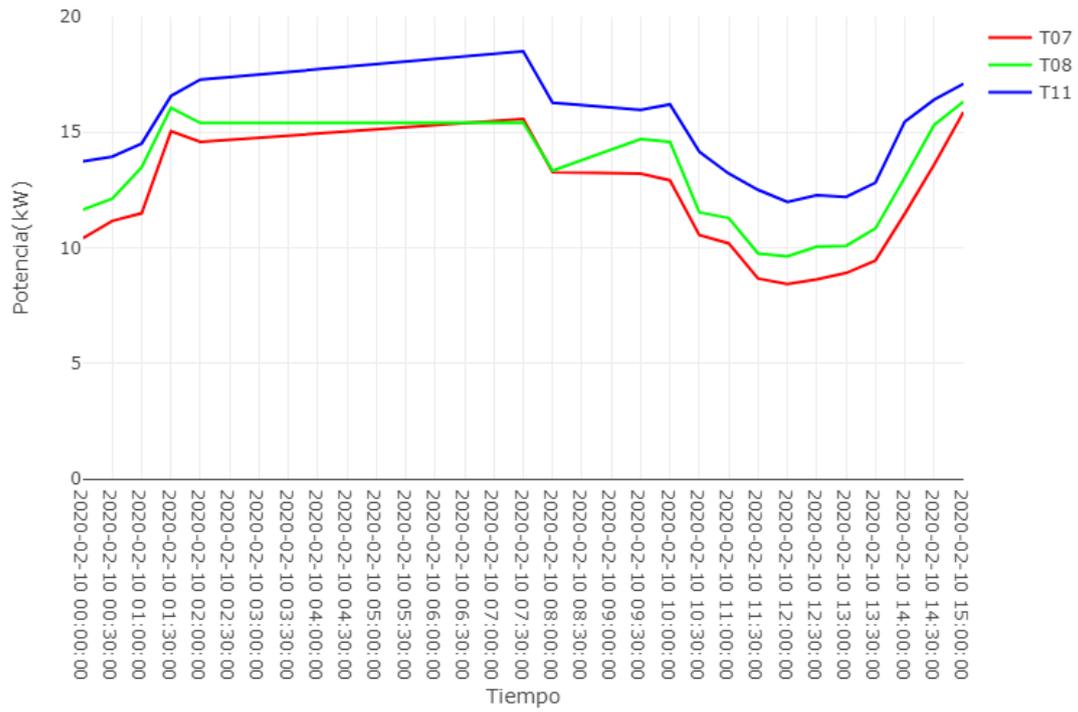


Figura 60. Gráfica del 10 de febrero de 2020.

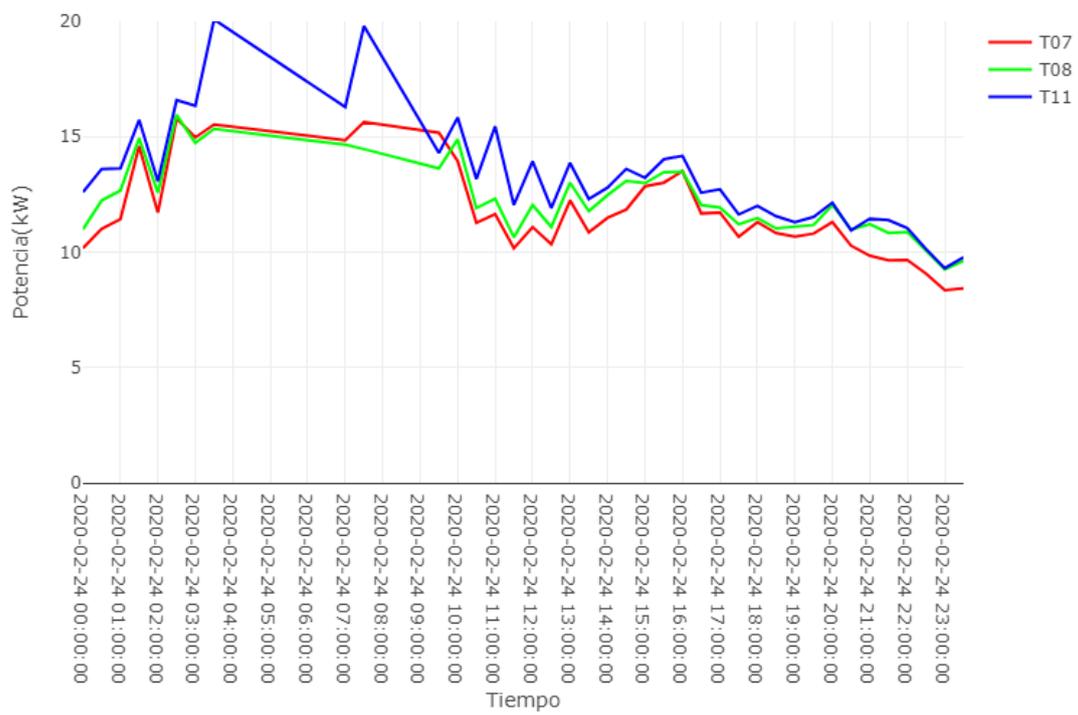


Figura 61. Gráfica del 24 de febrero de 2020.

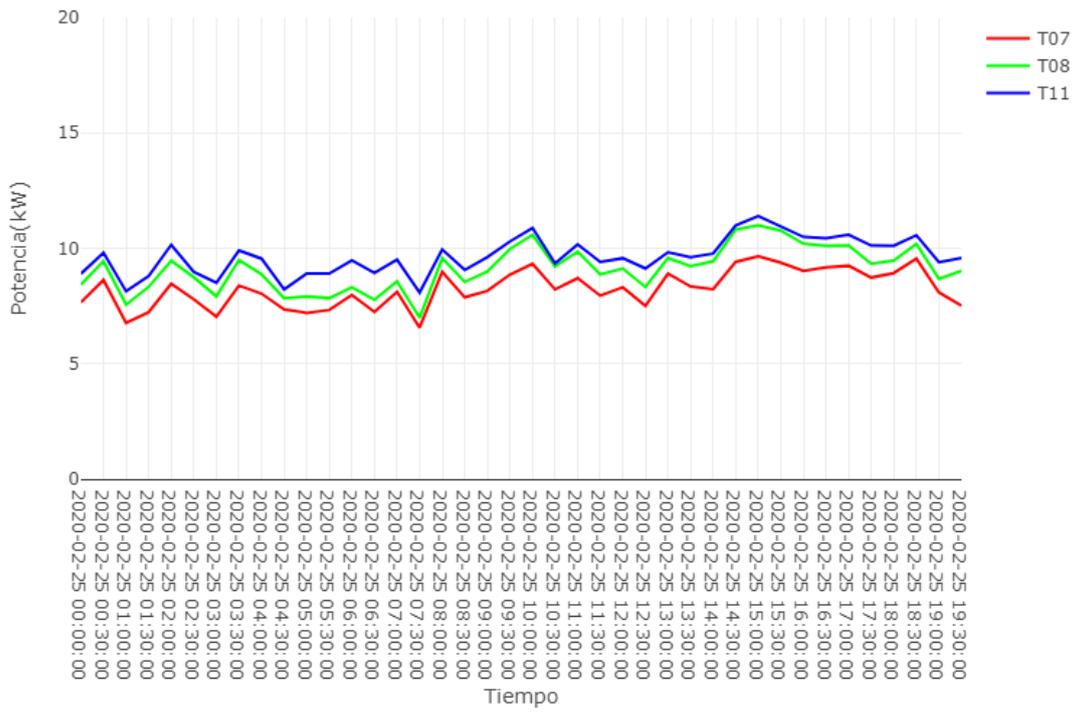


Figura 62. Gráfica del 25 de febrero de 2020.

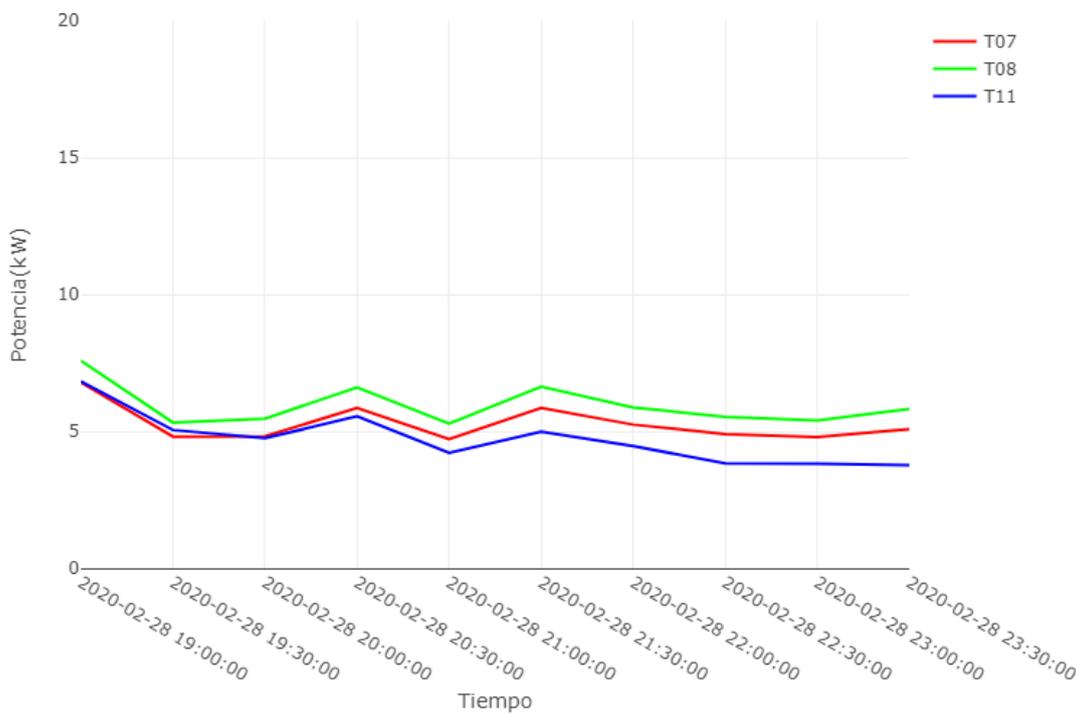


Figura 63. Gráfica del 28 de febrero de 2020.

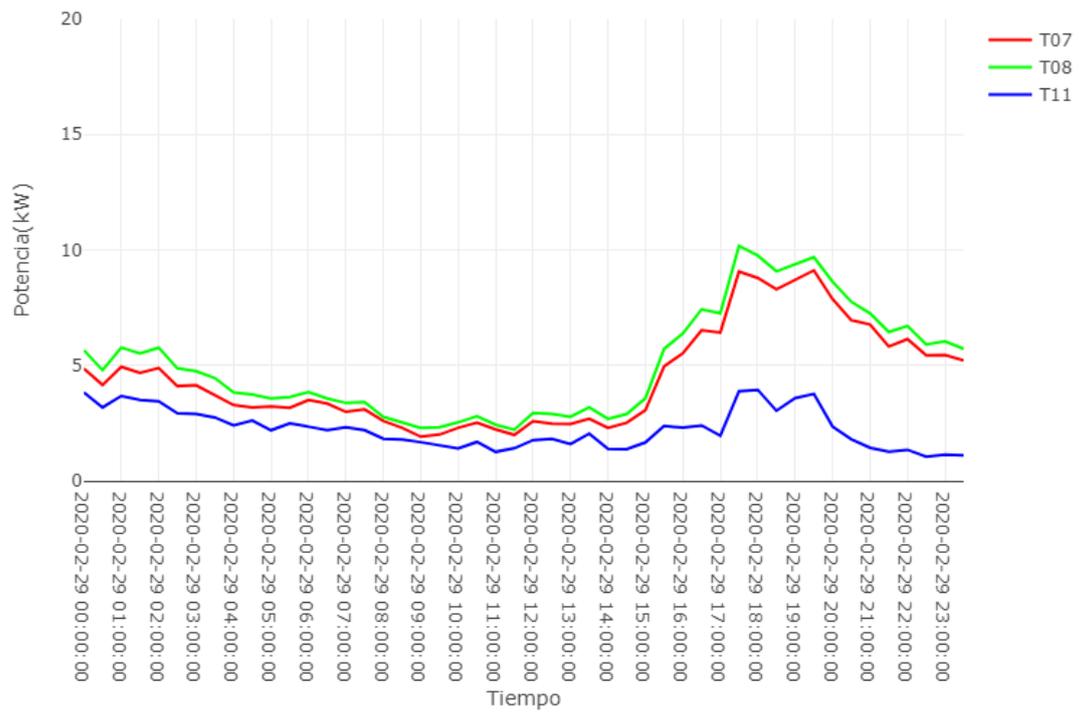


Figura 64. Gráfica del 29 de febrero de 2020.

10.9 GRÁFICAS EXTRA DE MARZO DE 2020

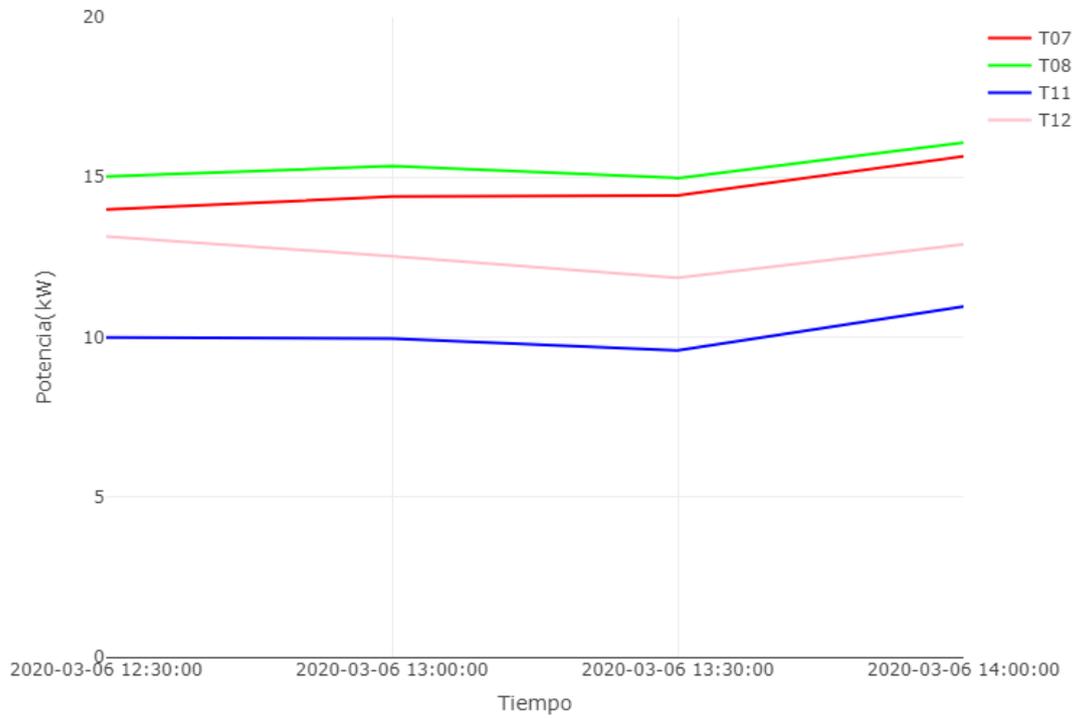


Figura 65. Gráfica del 6 de marzo de 2020.

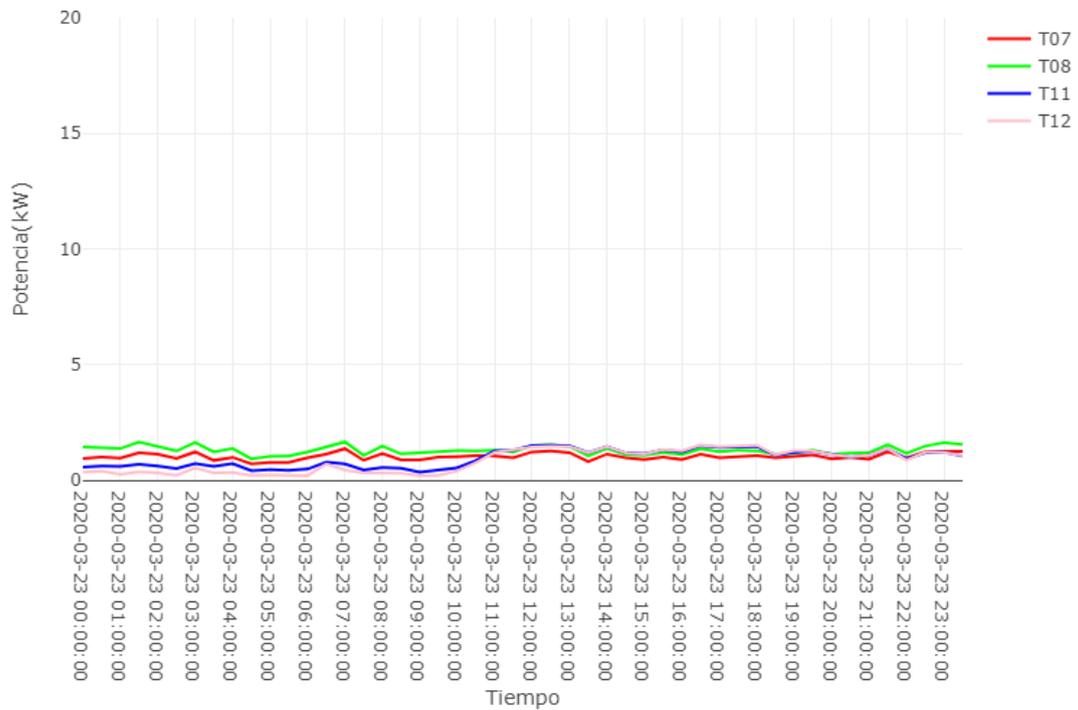


Figura 66. Gráfica del 23 de marzo de 2020.

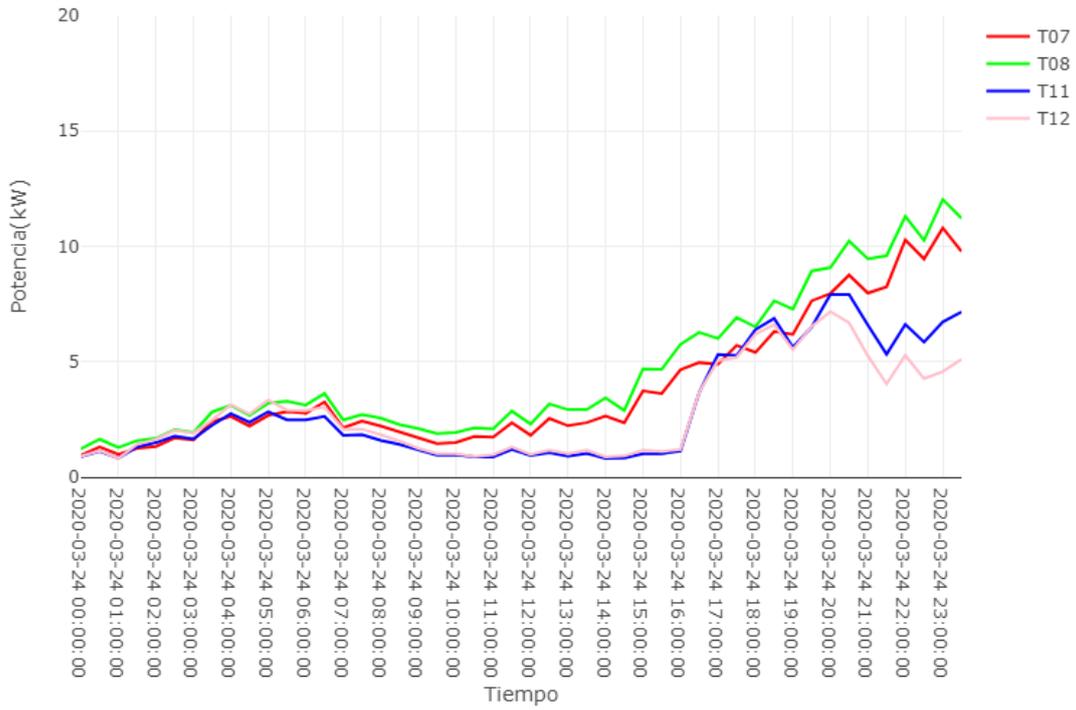


Figura 67. Gráfica del 24 de marzo de 2020.

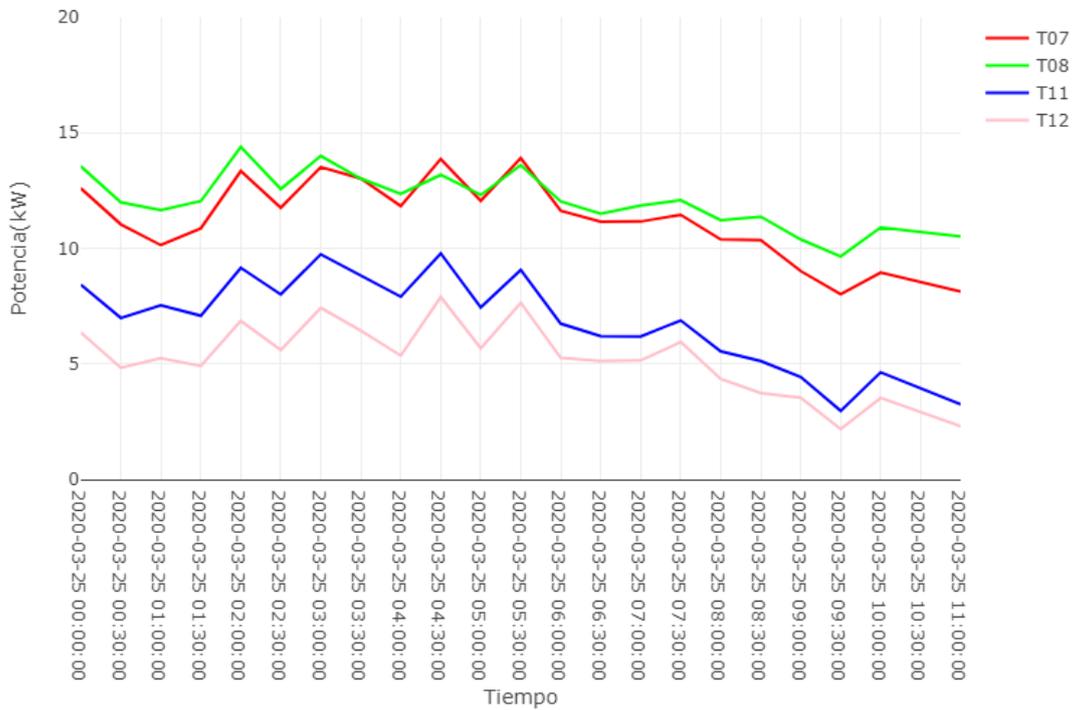


Figura 68. Gráfica del 25 de marzo de 2020.

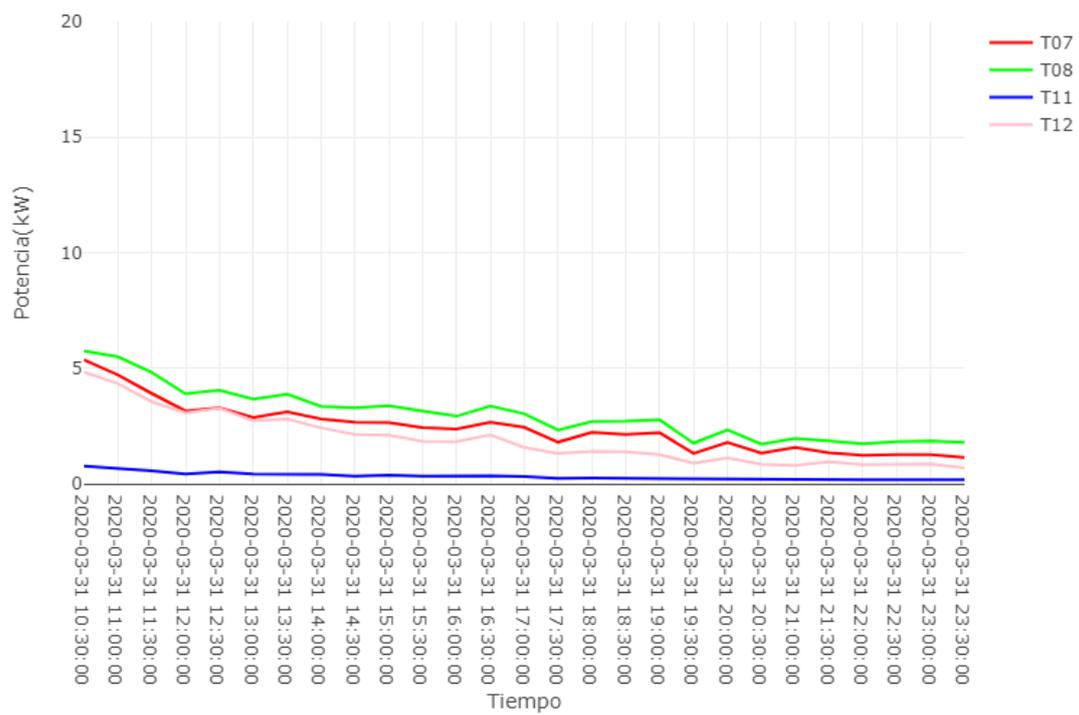


Figura 69. Gráfica del 31 de marzo de 2020.

10.10 GRÁFICAS EXTRA DE ABRIL DE 2020

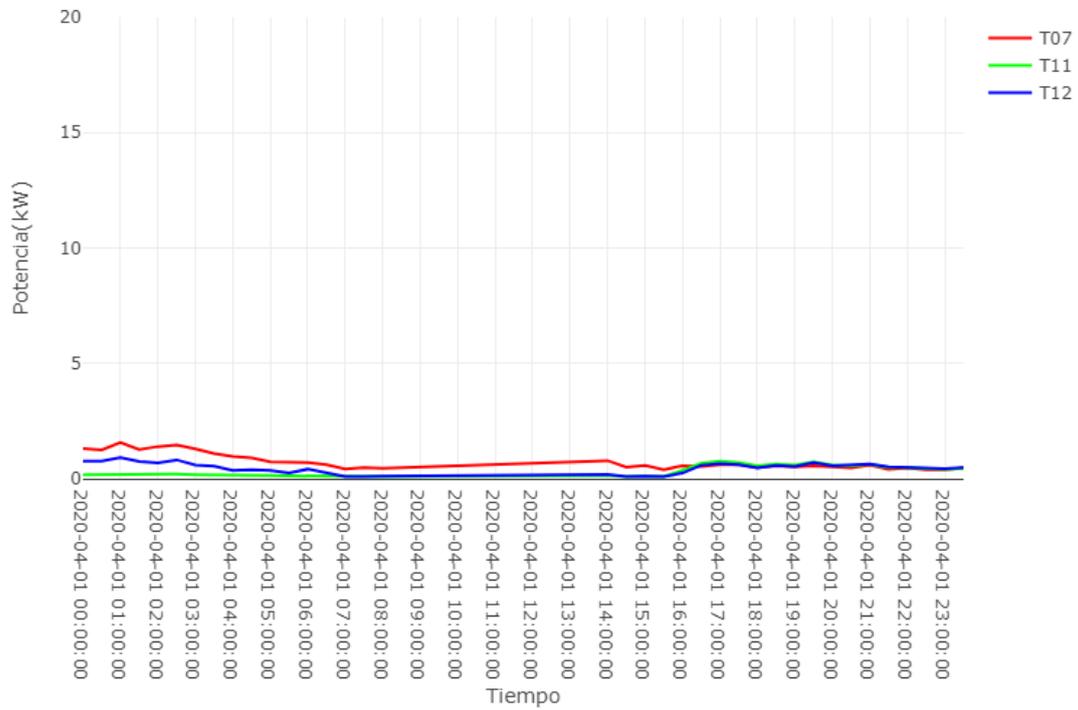


Figura 70. Gráfica del 1 de abril de 2020.

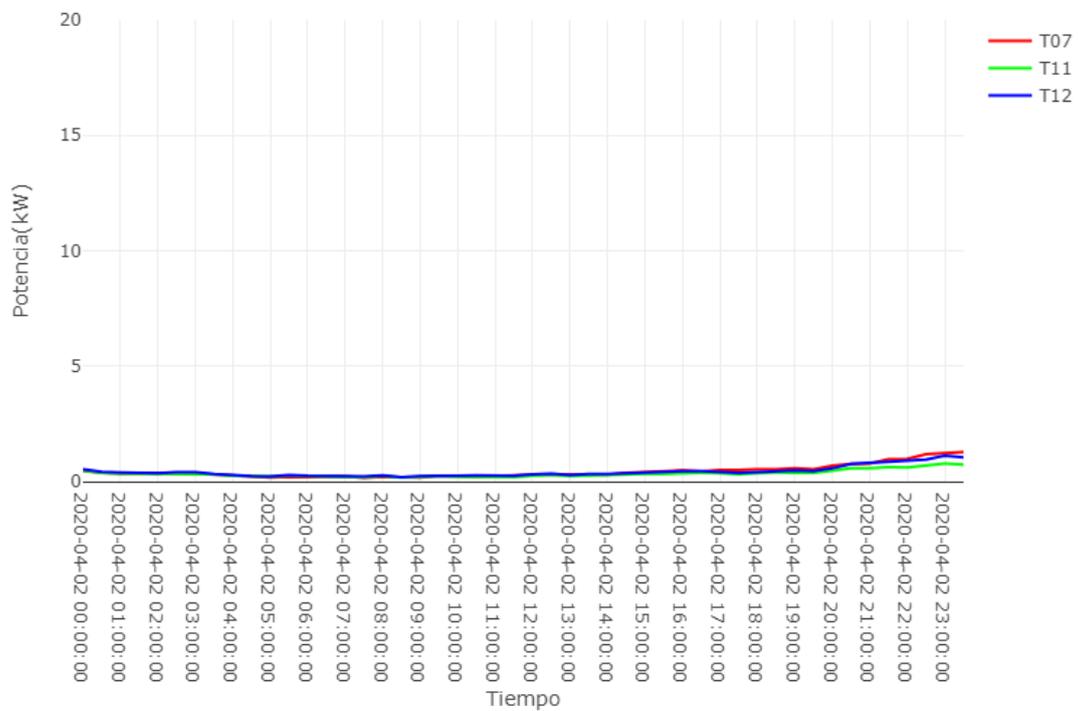


Figura 71. Gráfica del 2 de abril de 2020.

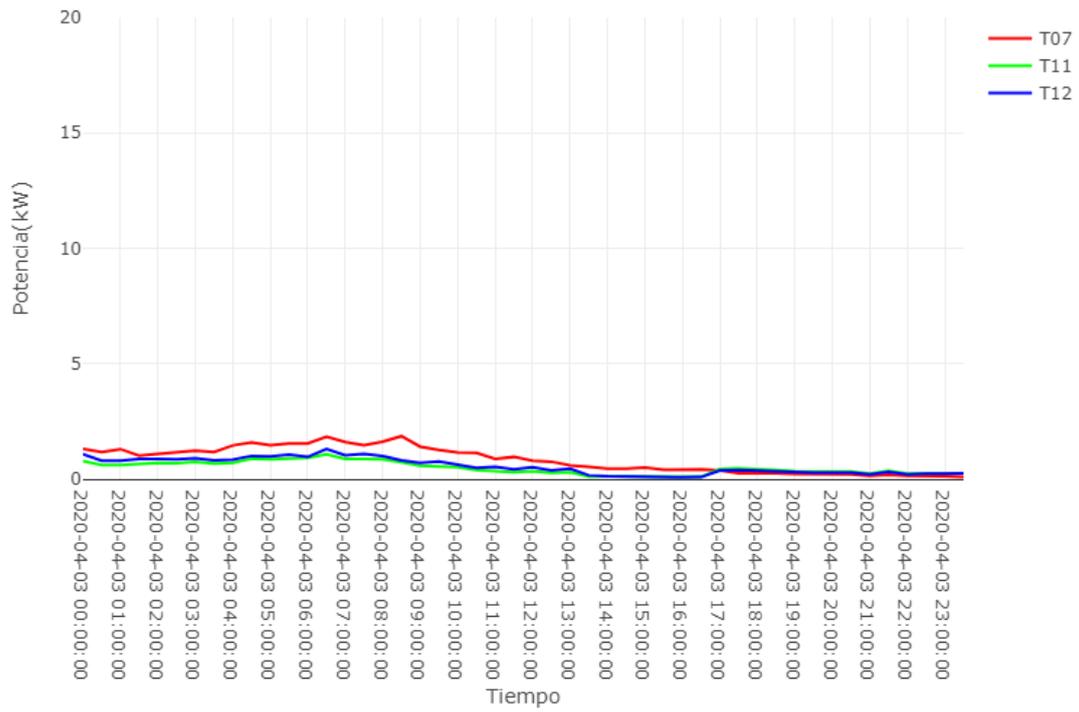


Figura 72. Gráfica del 3 de abril de 2020.

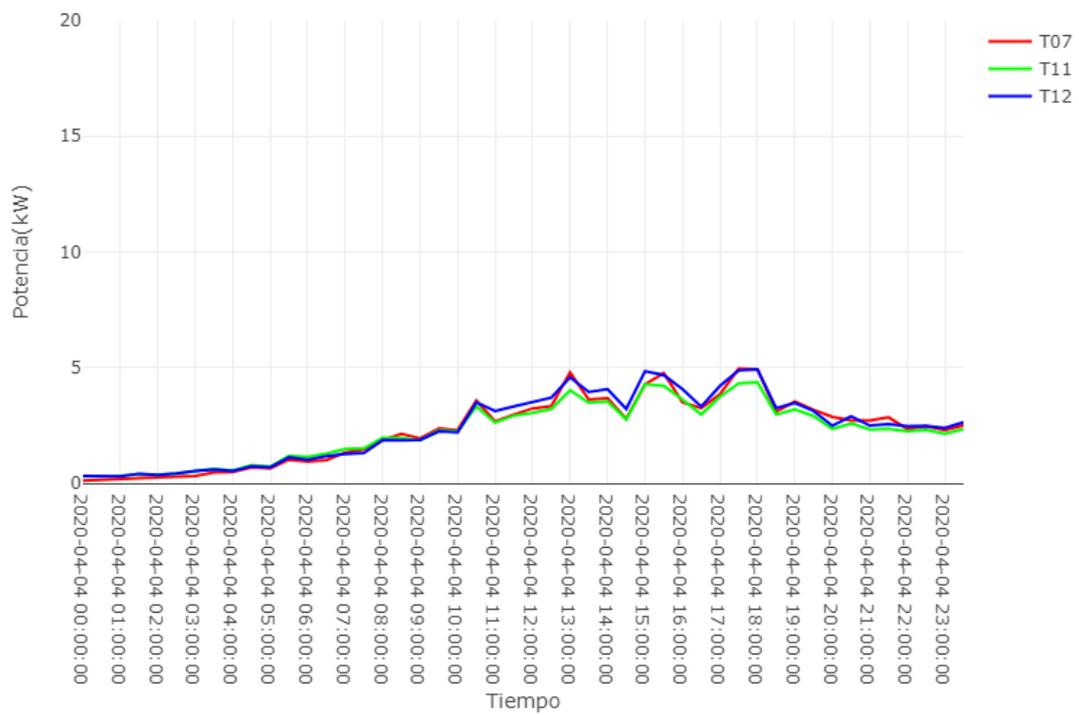


Figura 73. Gráfica del 4 de abril de 2020.

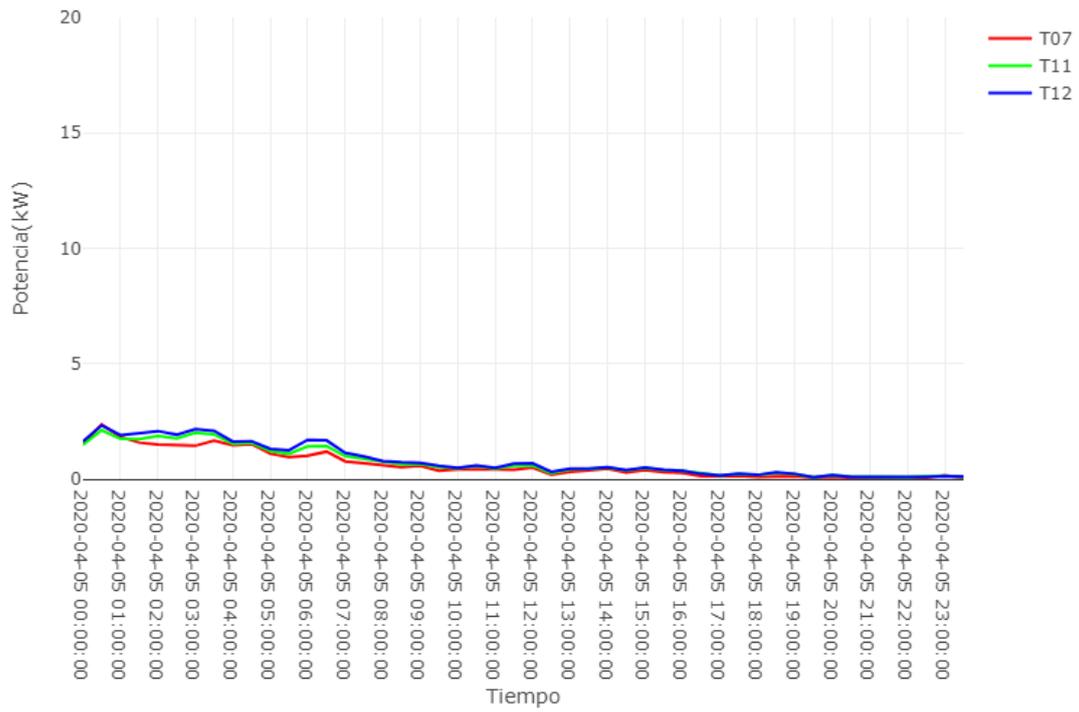


Figura 74. Gráfica del 5 de abril de 2020.

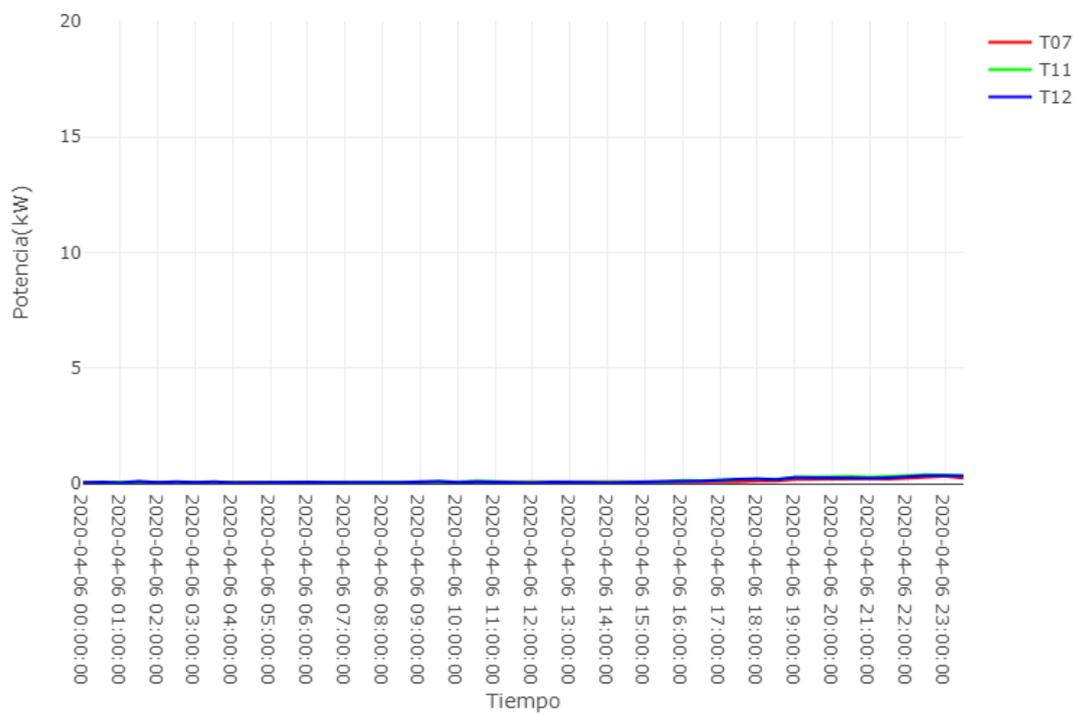


Figura 75. Gráfica del 6 de abril de 2020.

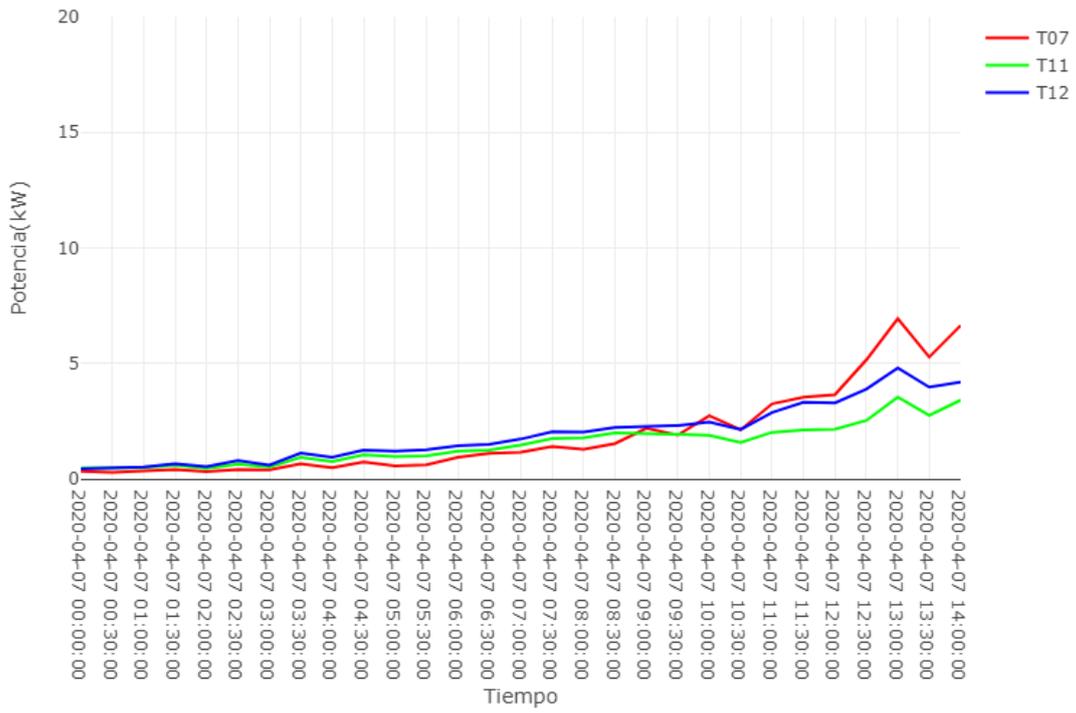


Figura 76. Gráfica del 7 de abril de 2020.

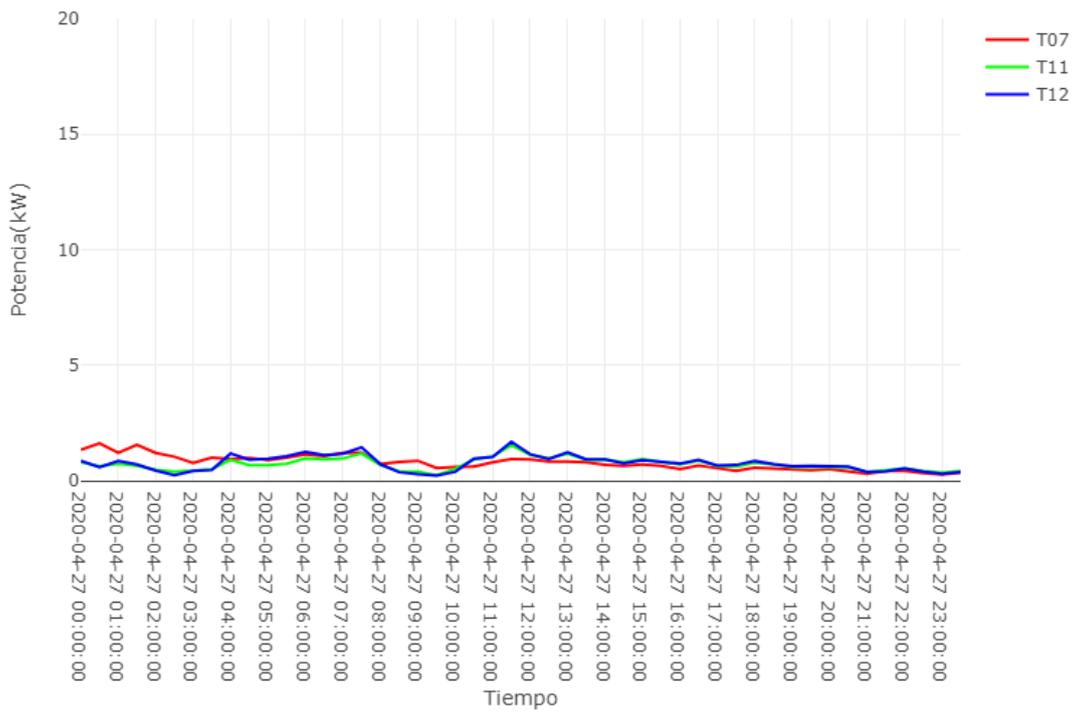


Figura 77. Gráfica del 27 de abril de 2020.

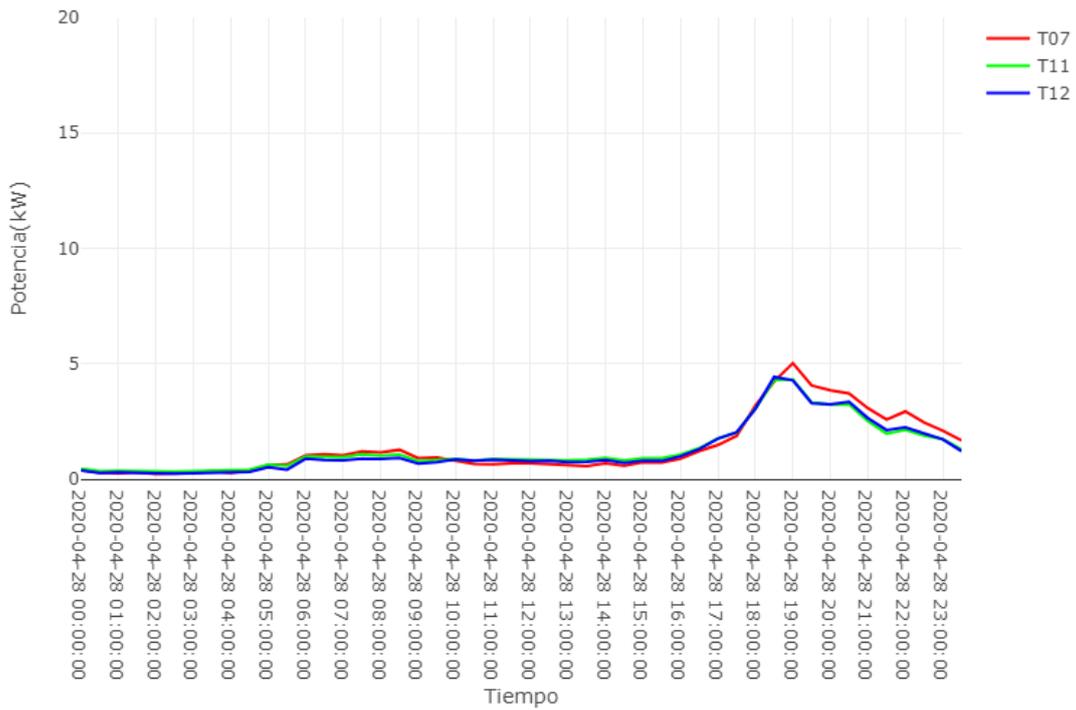


Figura 78. Gráfica del 28 de abril de 2020.

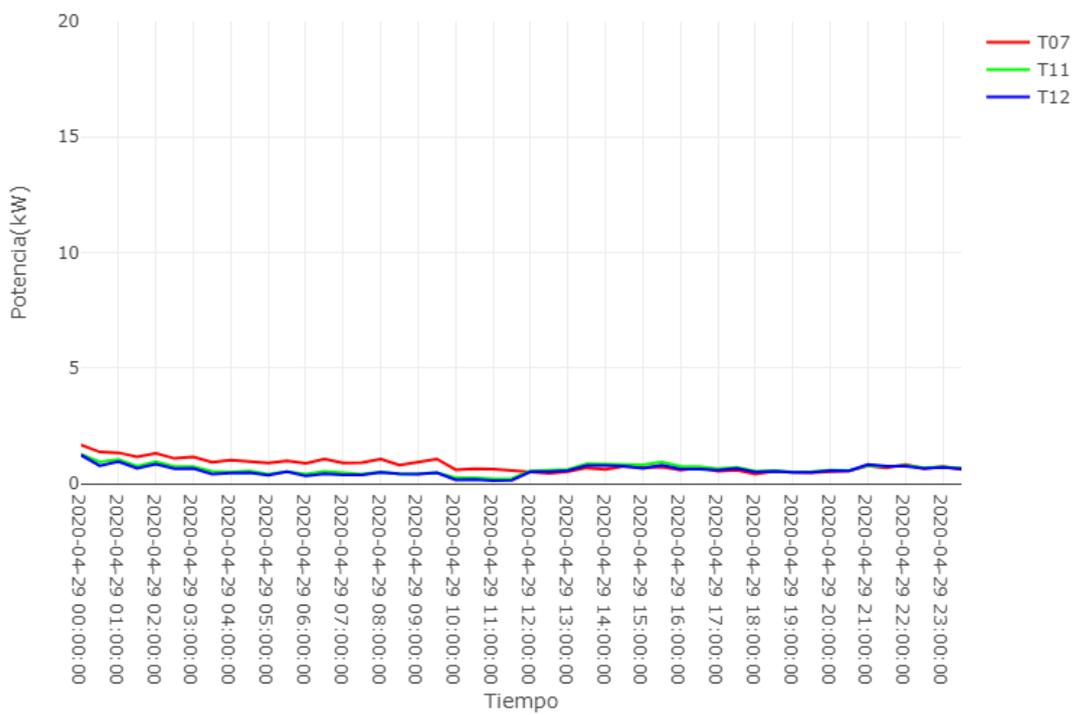


Figura 79. Gráfica del 29 de abril de 2020.

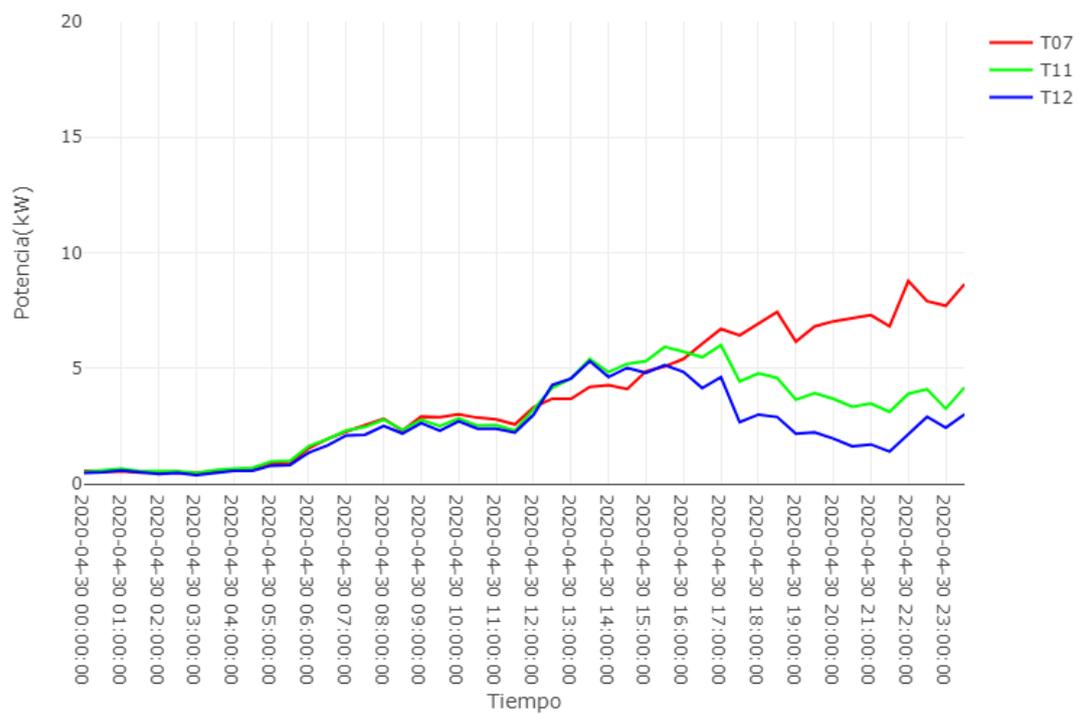


Figura 80. Gráfica del 30 de abril de 2020.

10.11 GRÁFICAS EXTRA DE MAYO DE 2020

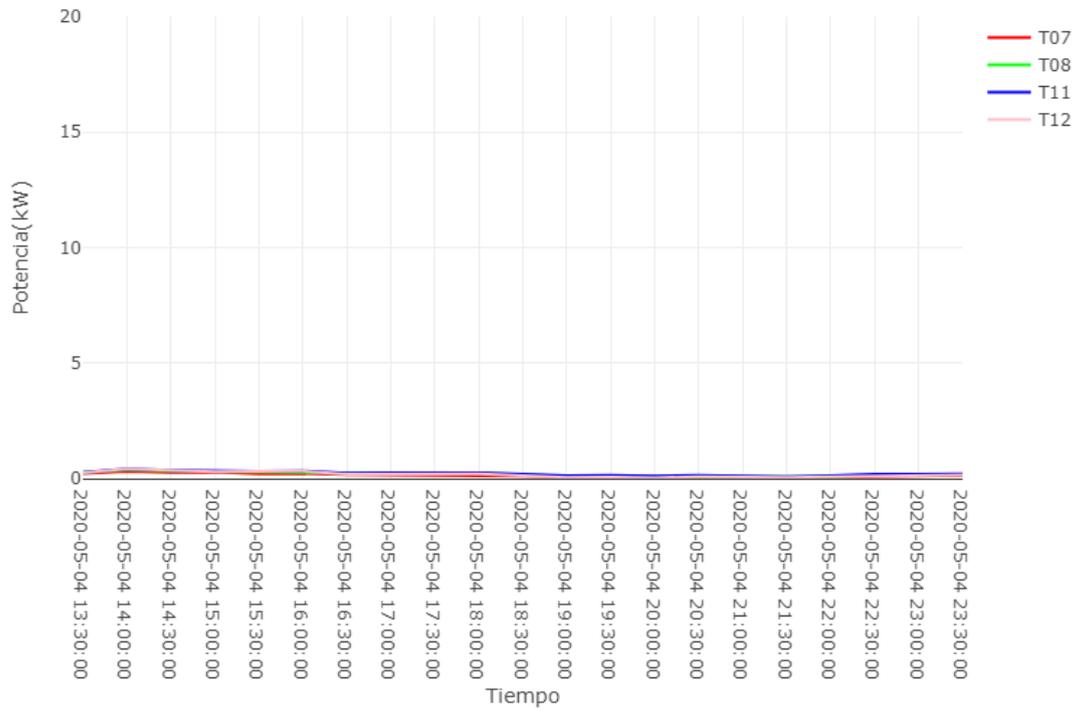


Figura 81. Gráfica del 4 de mayo de 2020.

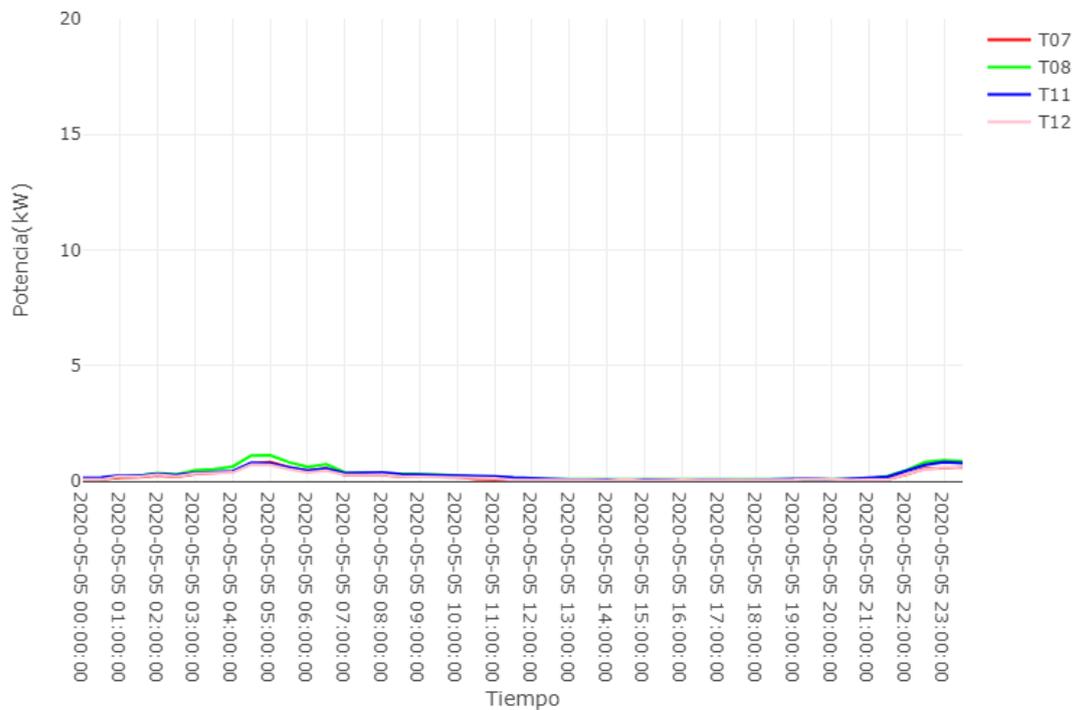


Figura 82. Gráfica del 5 de mayo de 2020.

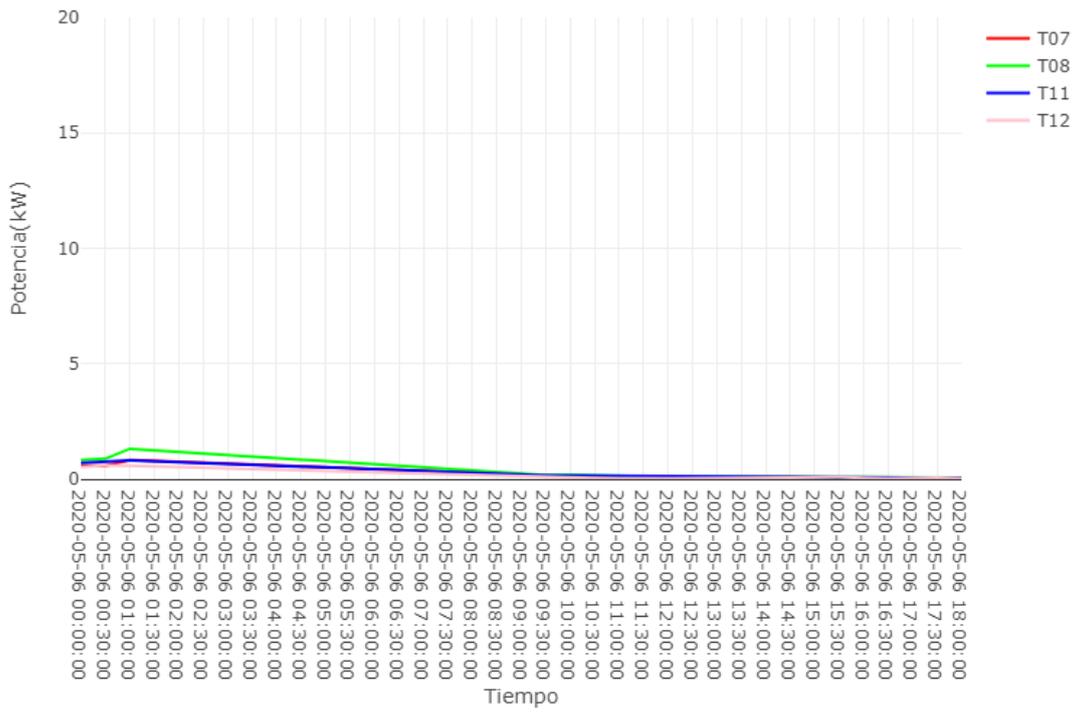


Figura 83. Gráfica del 6 de mayo de 2020.

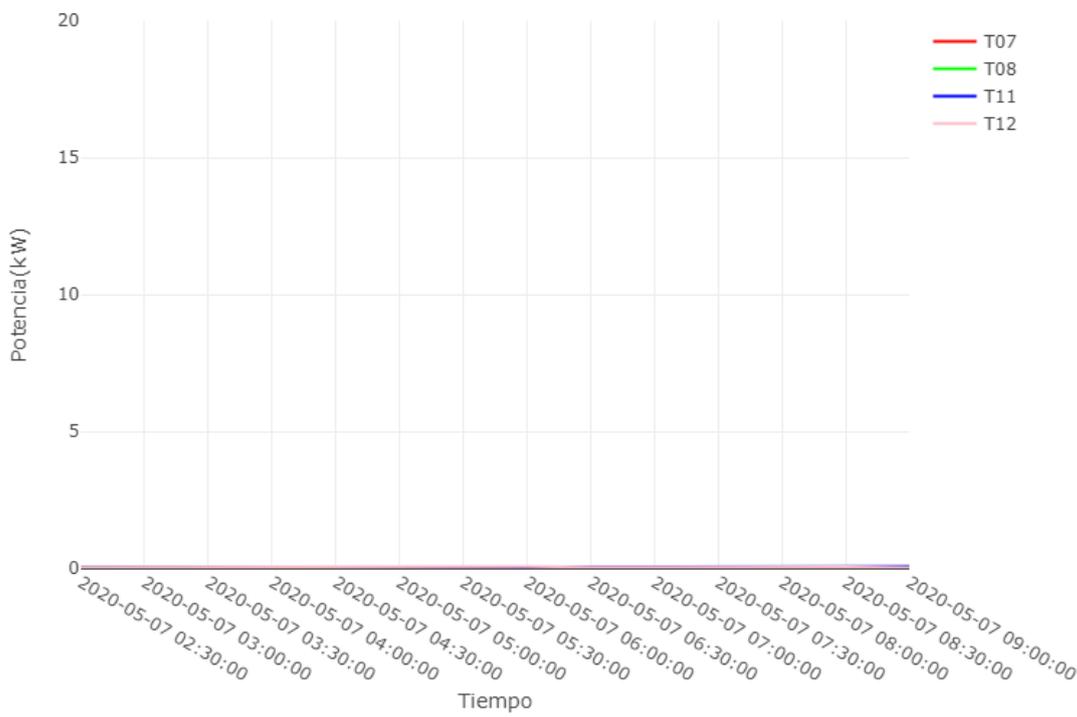


Figura 84. Gráfica del 7 de mayo de 2020.

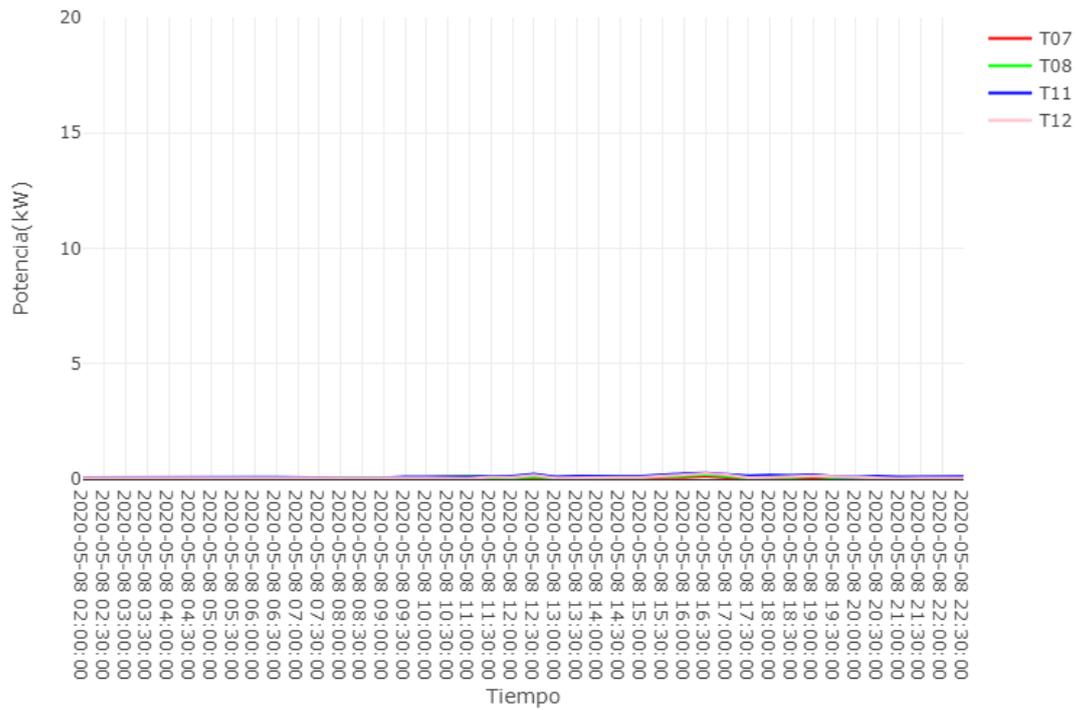


Figura 85. Gráfica del 8 de mayo de 2020.

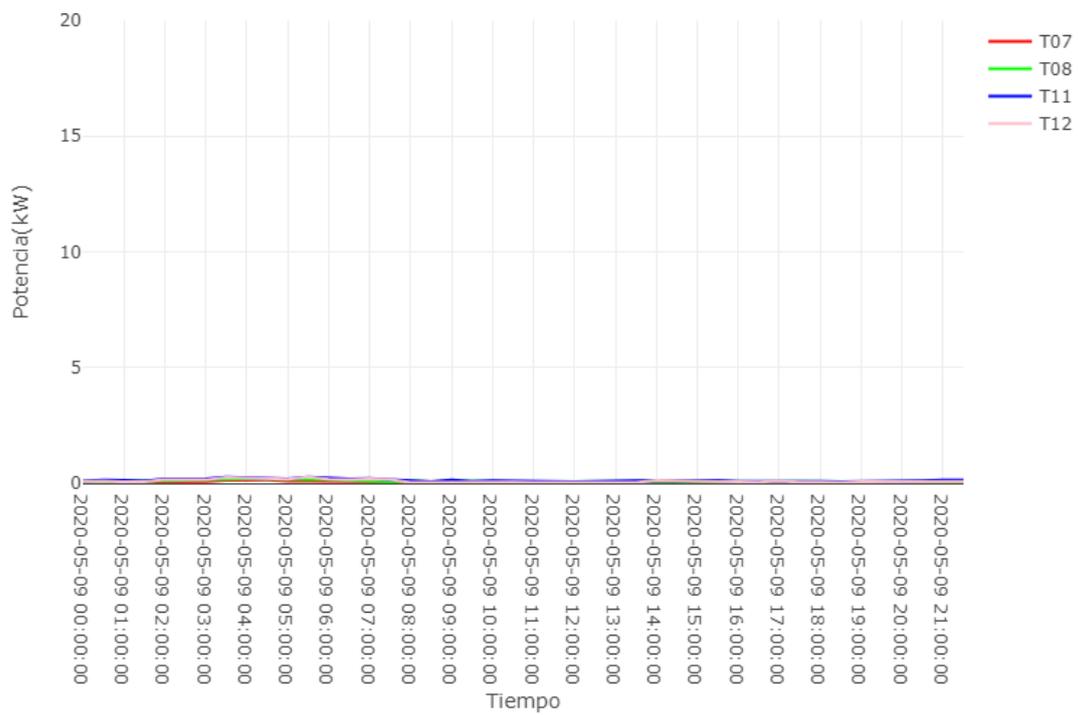


Figura 86. Gráfica del 9 de mayo de 2020.

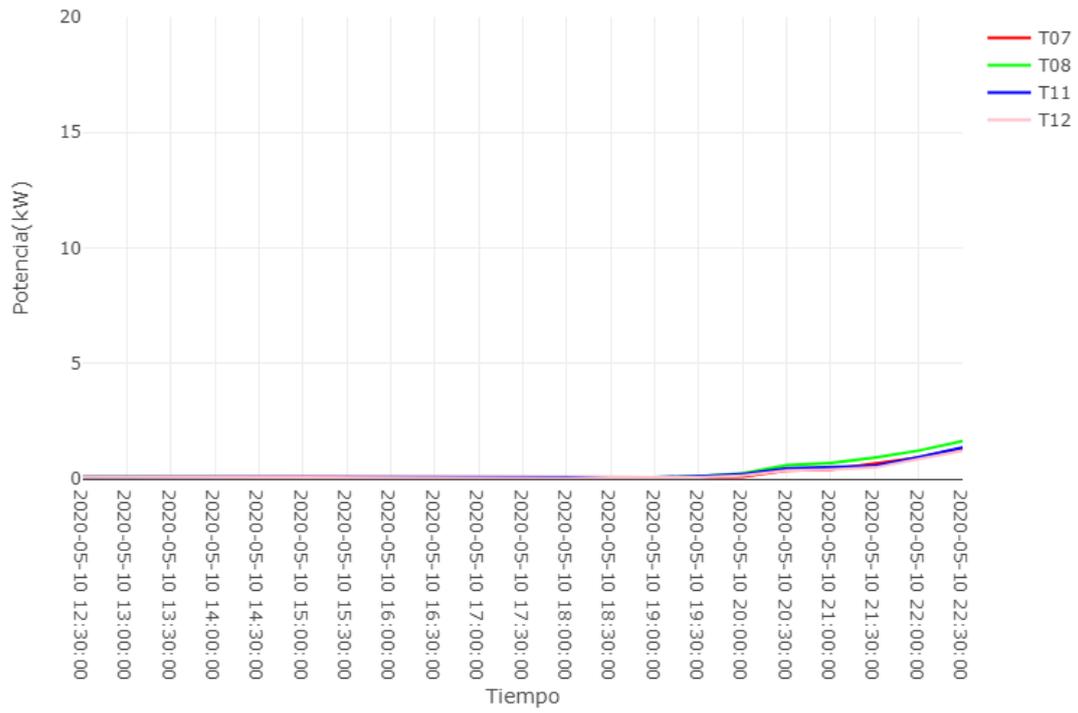


Figura 87. Gráfica del 10 de mayo de 2020.

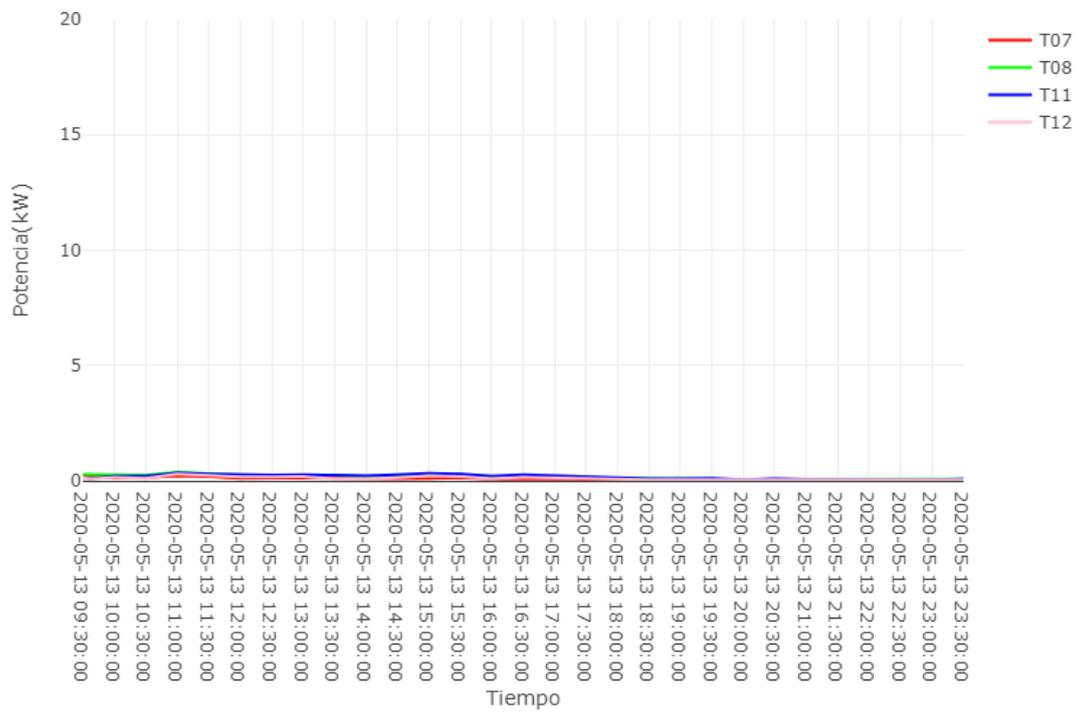


Figura 88. Gráfica del 13 de mayo de 2020.

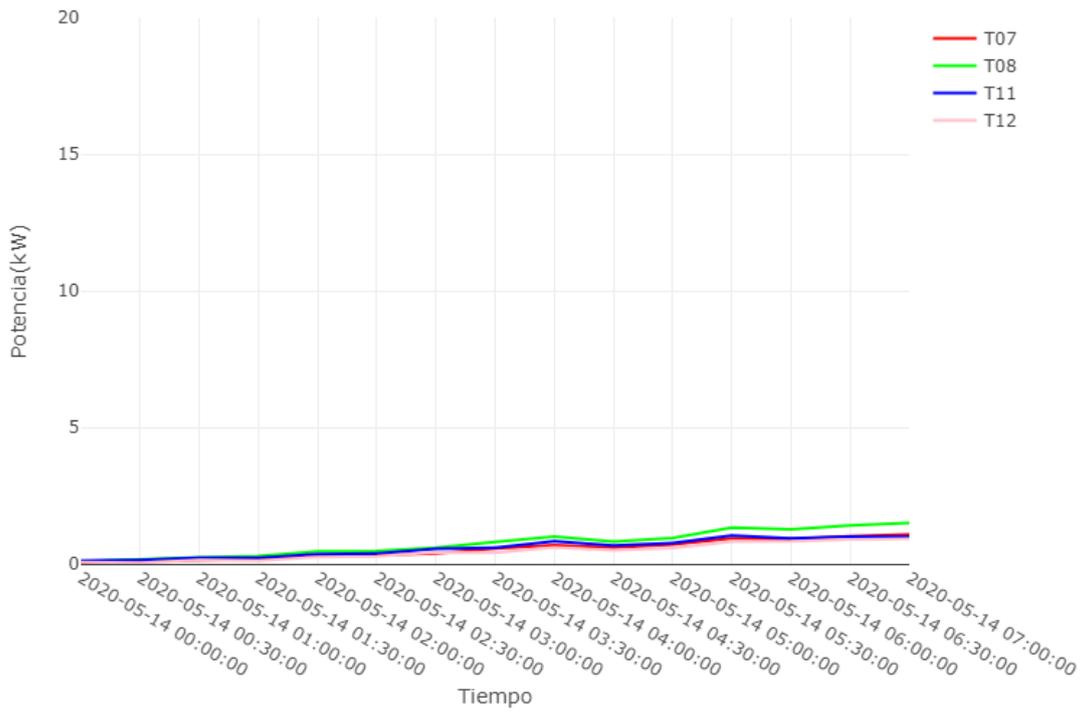


Figura 89. Gráfica del 14 de mayo de 2020.

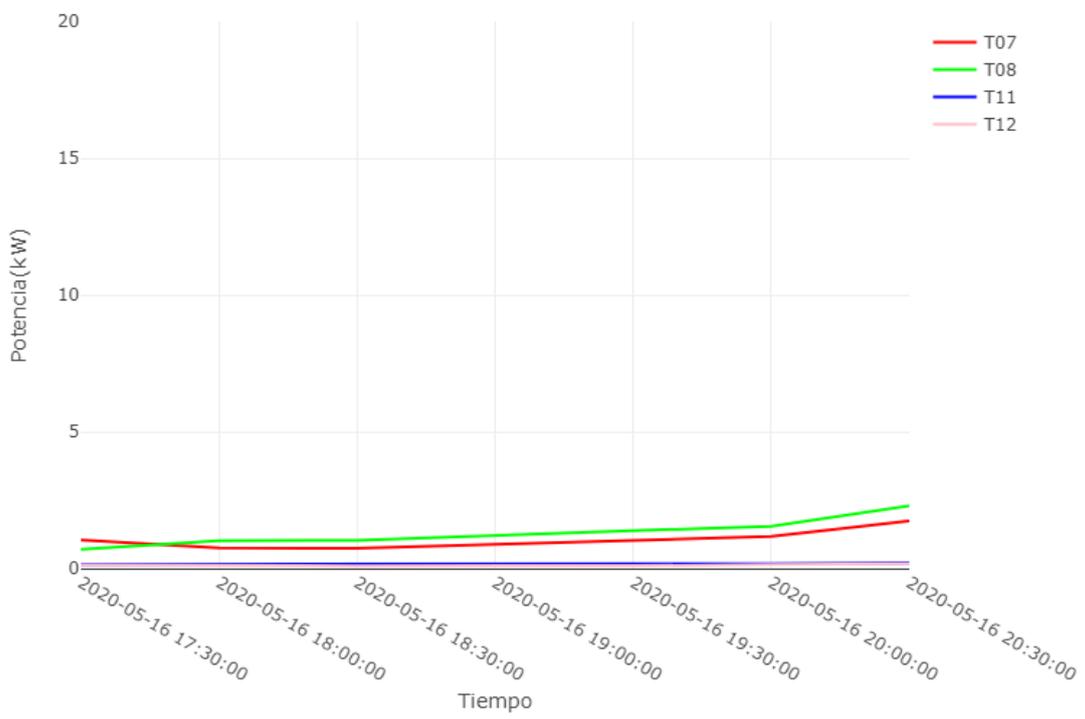


Figura 90. Gráfica del 16 de mayo de 2020.

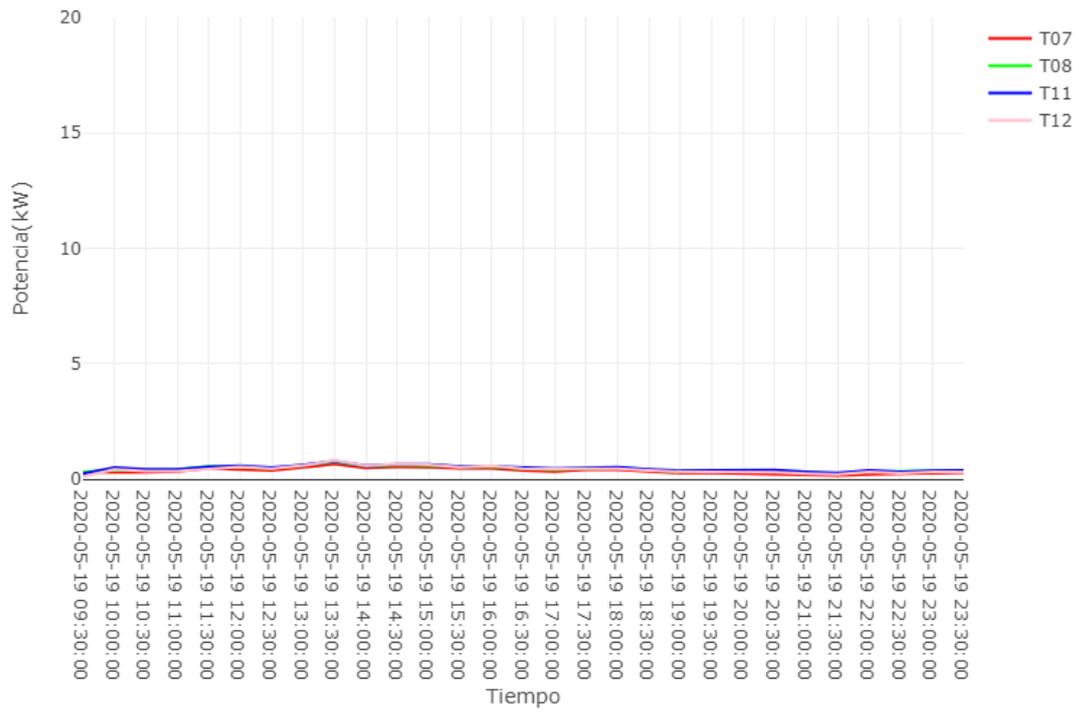


Figura 91. Gráfica del 19 de mayo de 2020.

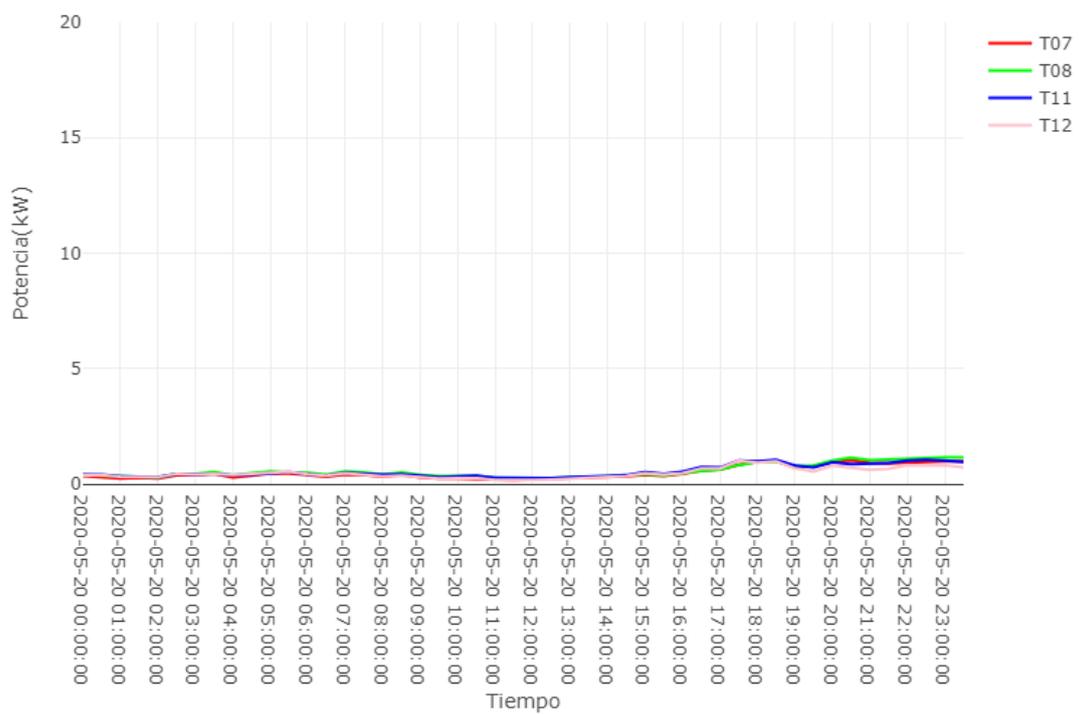


Figura 92. Gráfica del 20 de mayo de 2020.

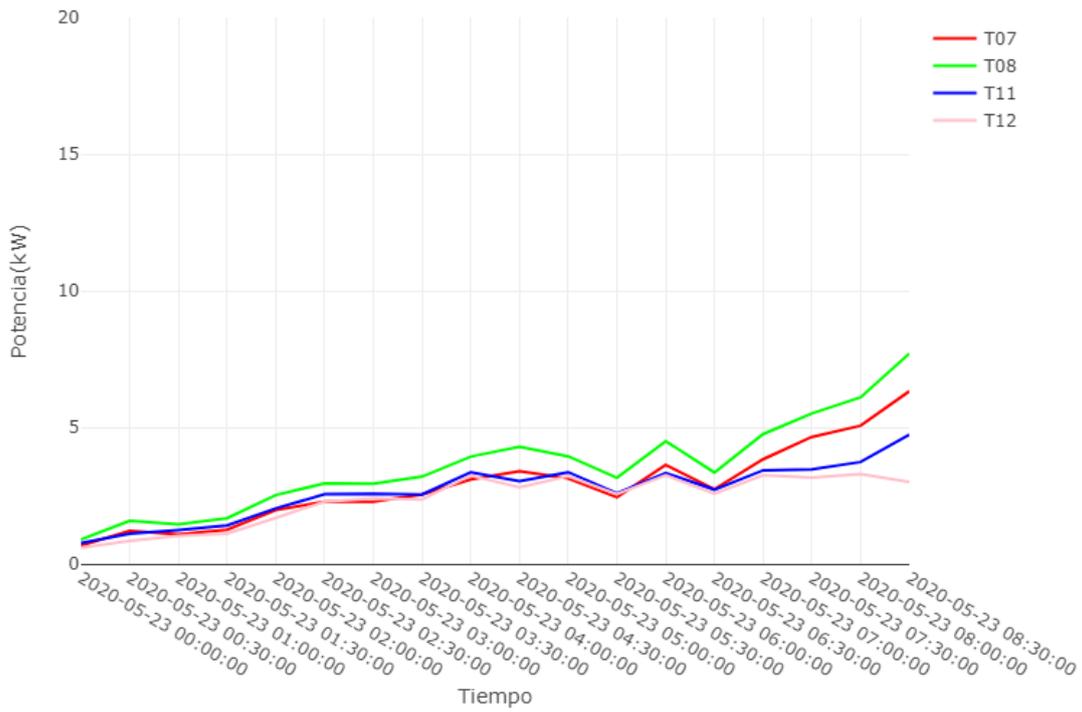


Figura 93. Gráfica del 23 de mayo de 2020.

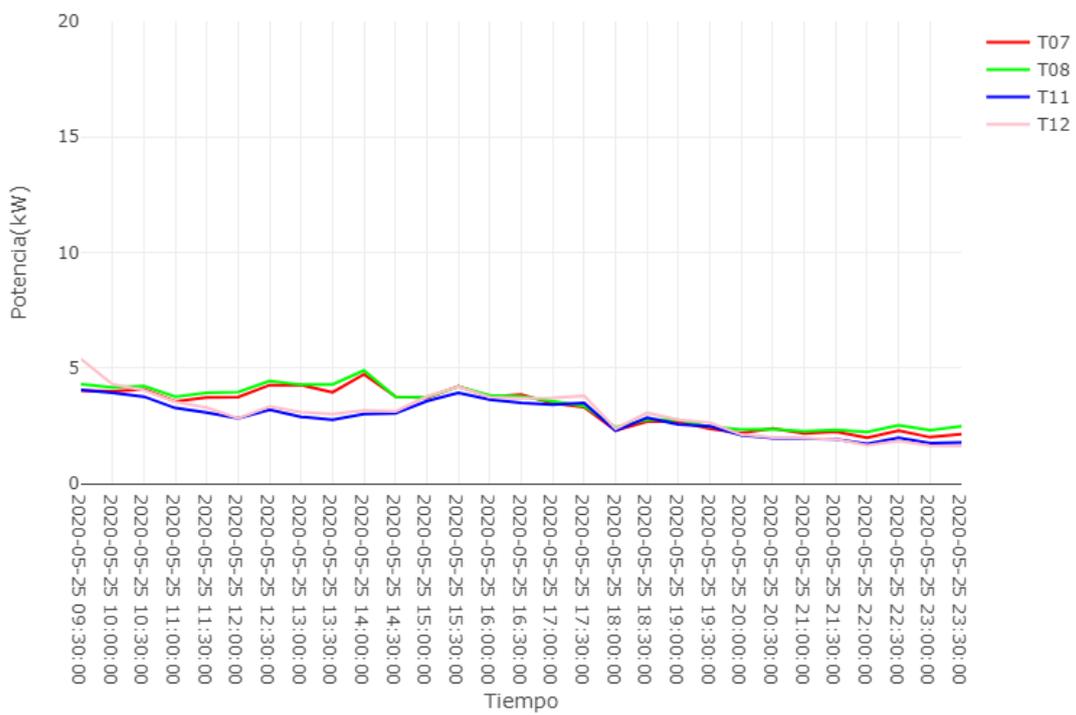


Figura 94. Gráfica del 25 de mayo de 2020.

10.12 GRÁFICAS EXTRA DE JUNIO DE 2020

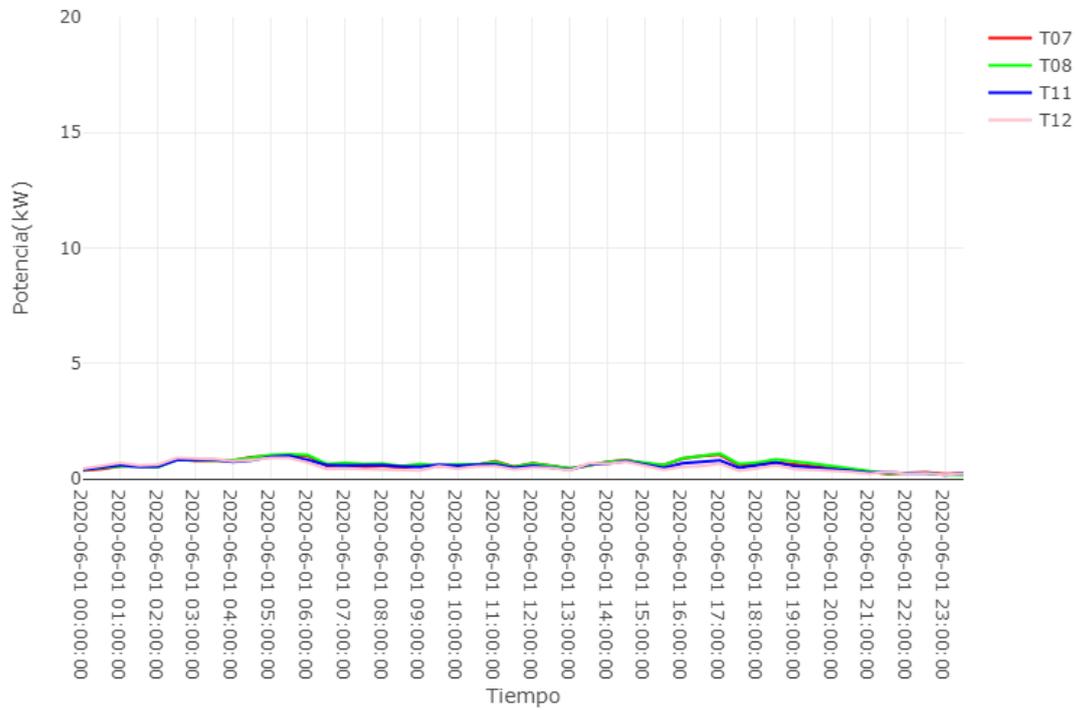


Figura 95. Gráfica del 1 de junio de 2020.

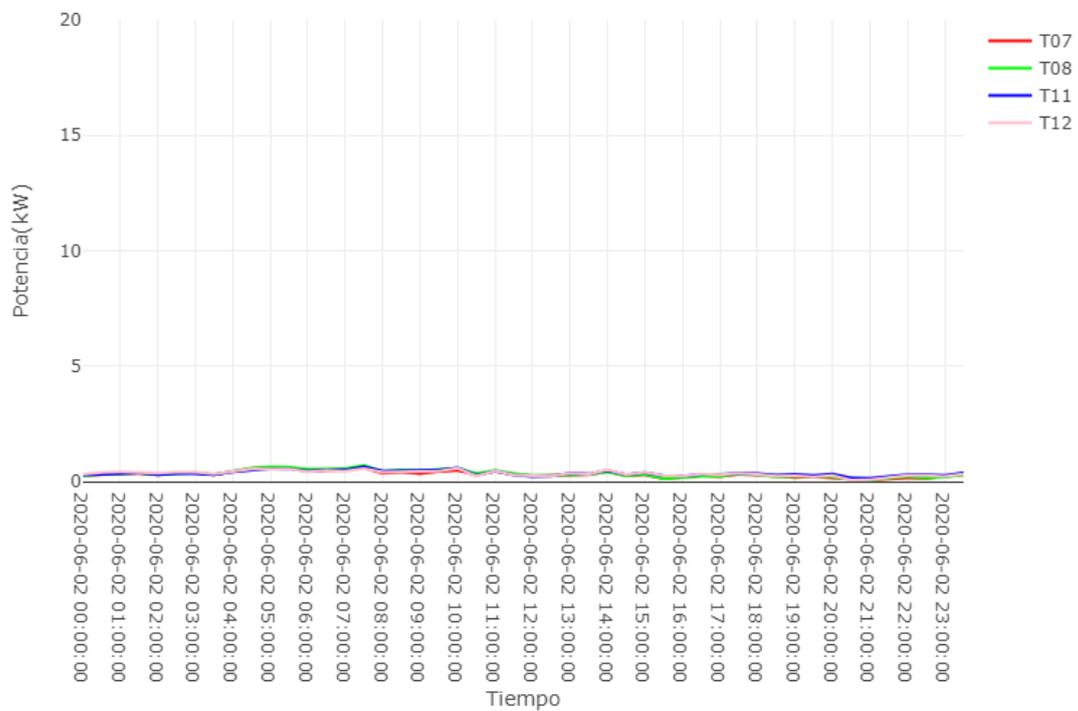


Figura 96. Gráfica del 2 de junio de 2020.

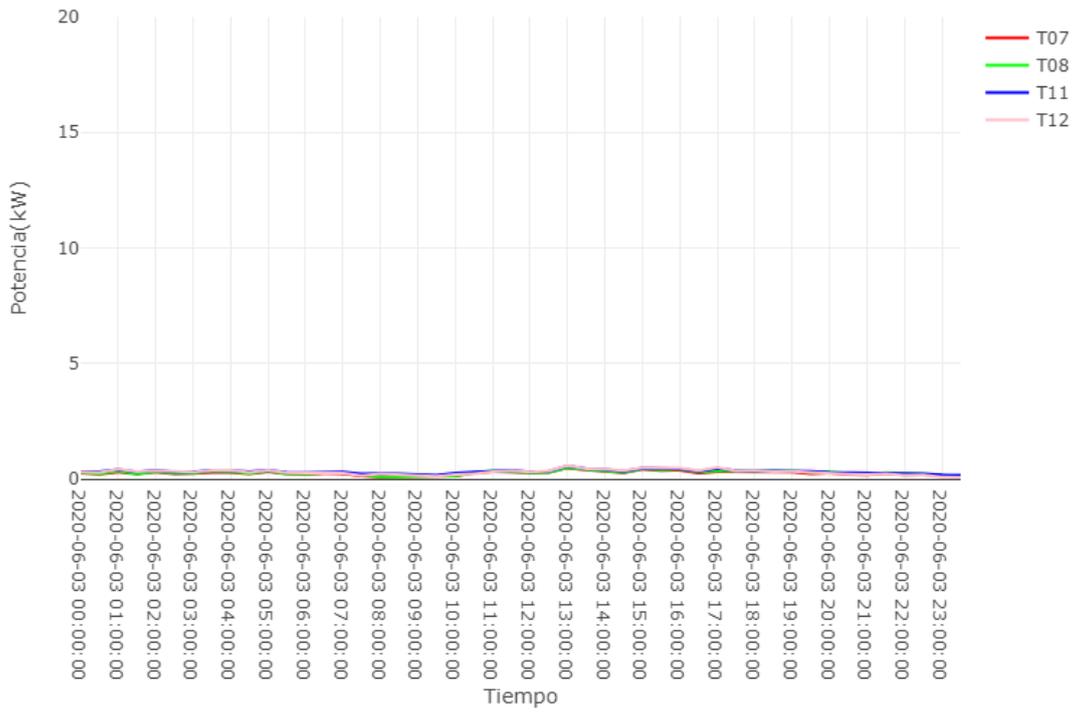


Figura 97. Gráfica del 3 de junio de 2020.

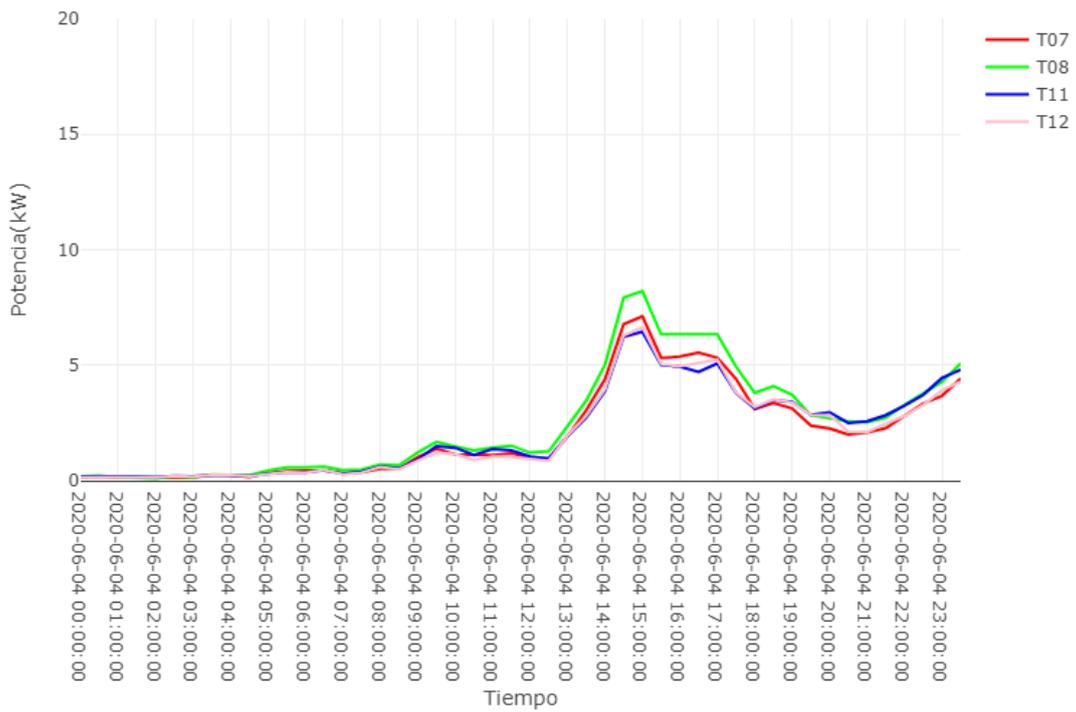


Figura 98. Gráfica del 4 de junio de 2020.

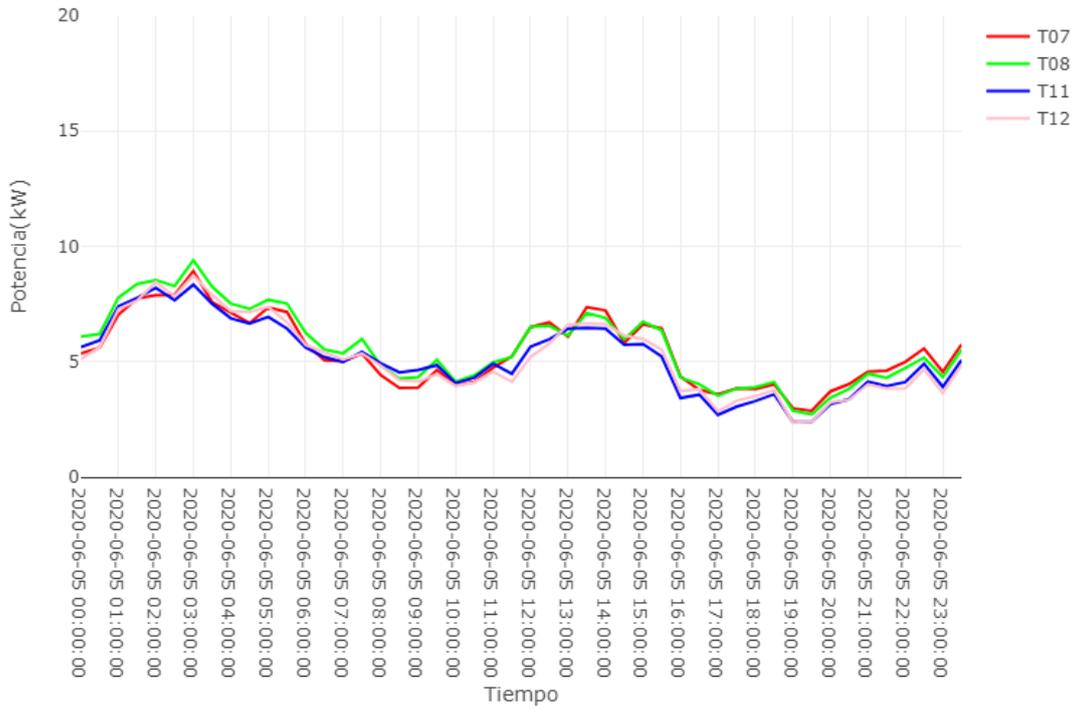


Figura 99. Gráfica del 5 de junio de 2020.

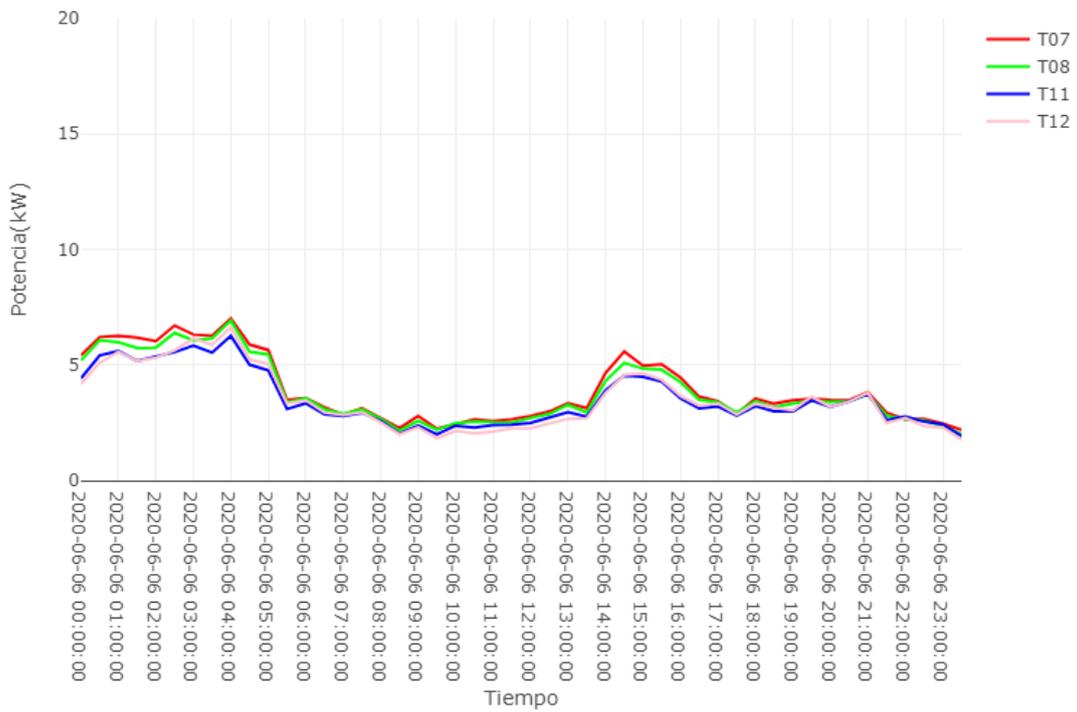


Figura 100. Gráfica del 6 de junio de 2020.

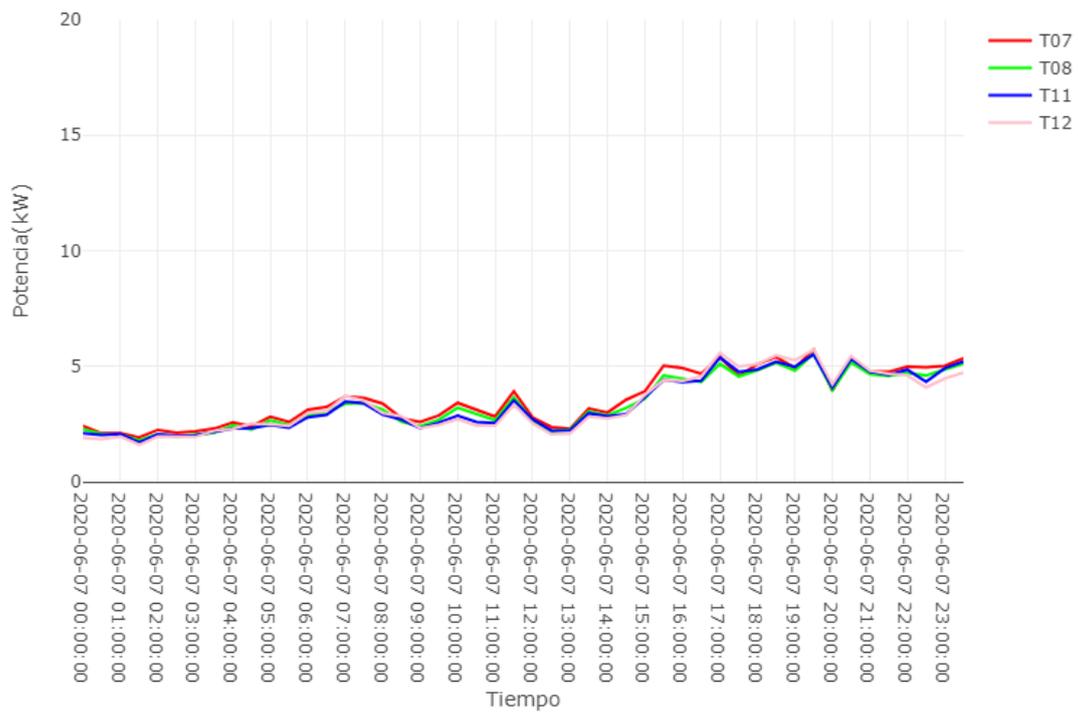


Figura 101. Gráfica del 7 de junio de 2020.

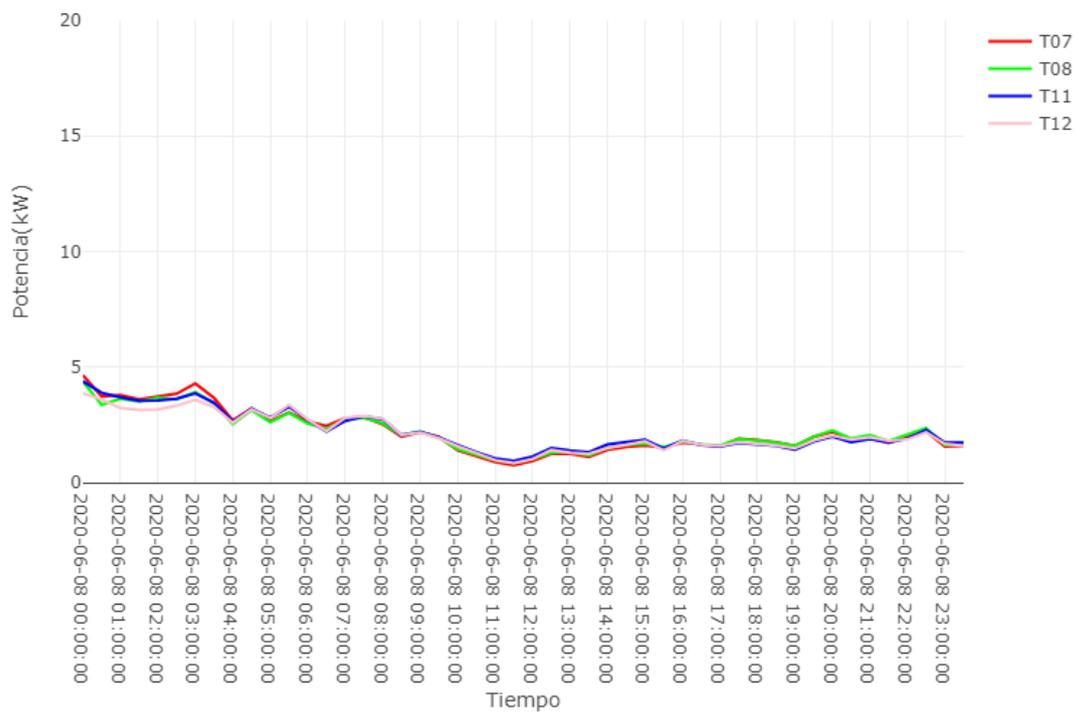


Figura 102. Gráfica del 8 de junio de 2020.

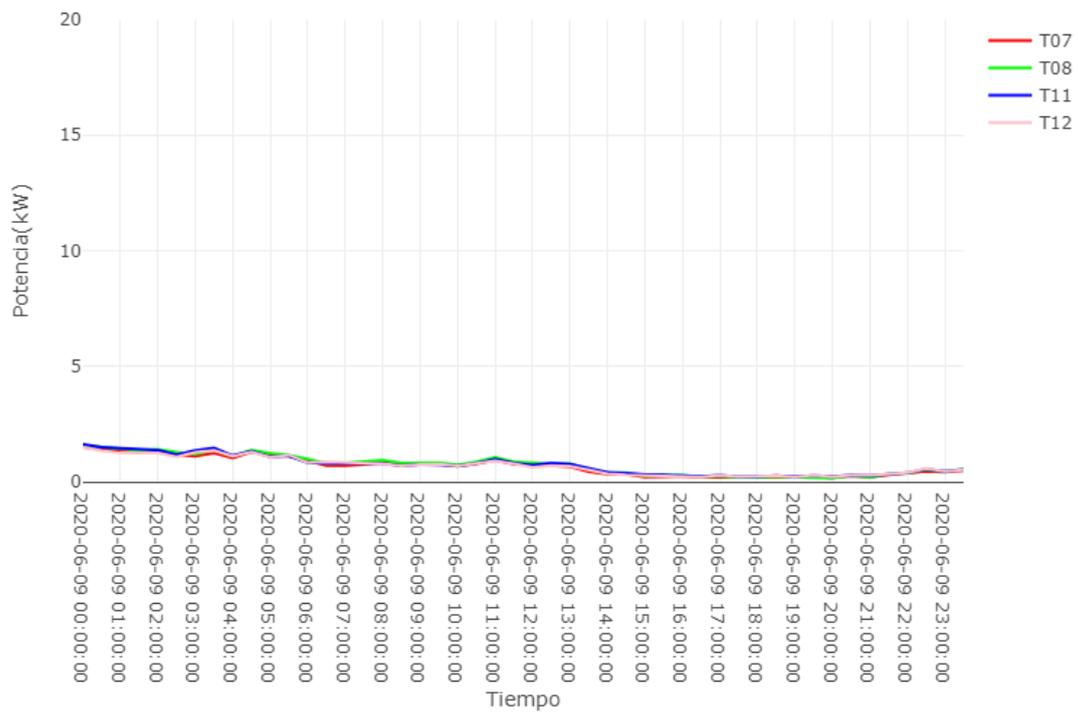


Figura 103. Gráfica del 9 de junio de 2020.

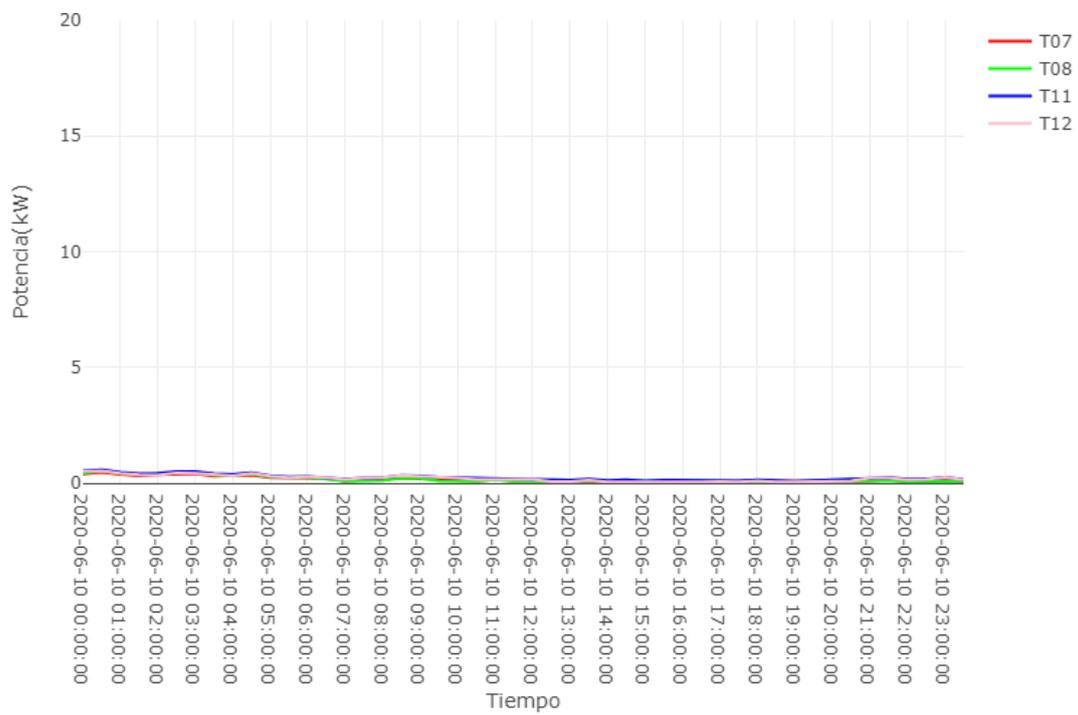


Figura 104. Gráfica del 10 de junio de 2020.

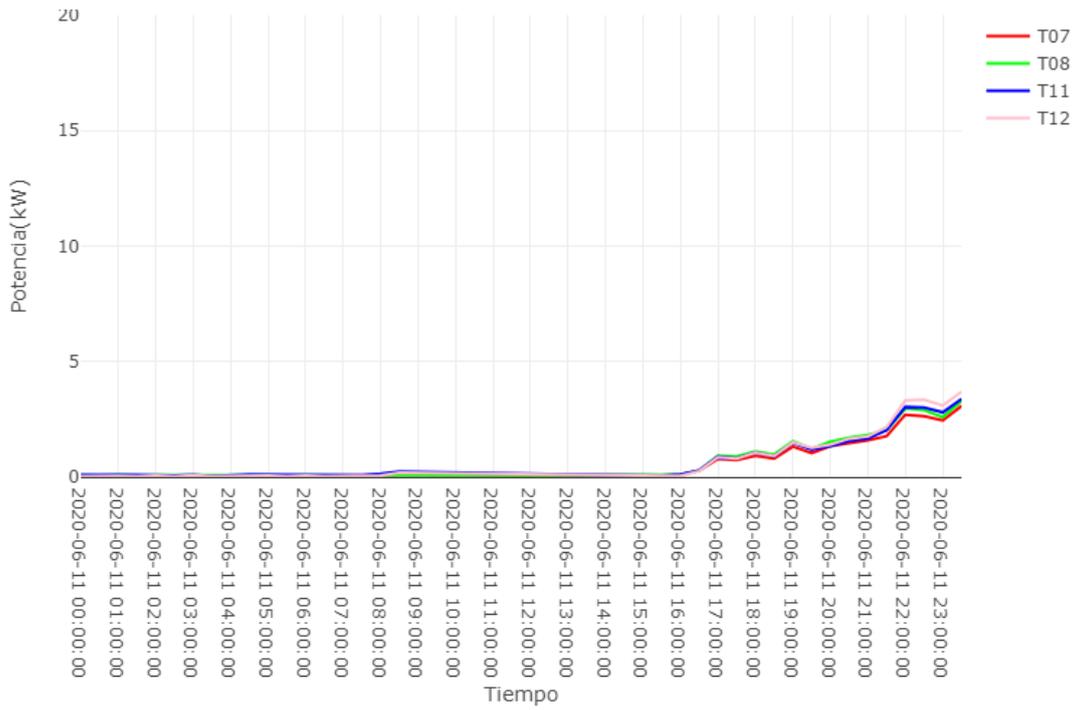


Figura 105. Gráfica del 11 de junio de 2020.

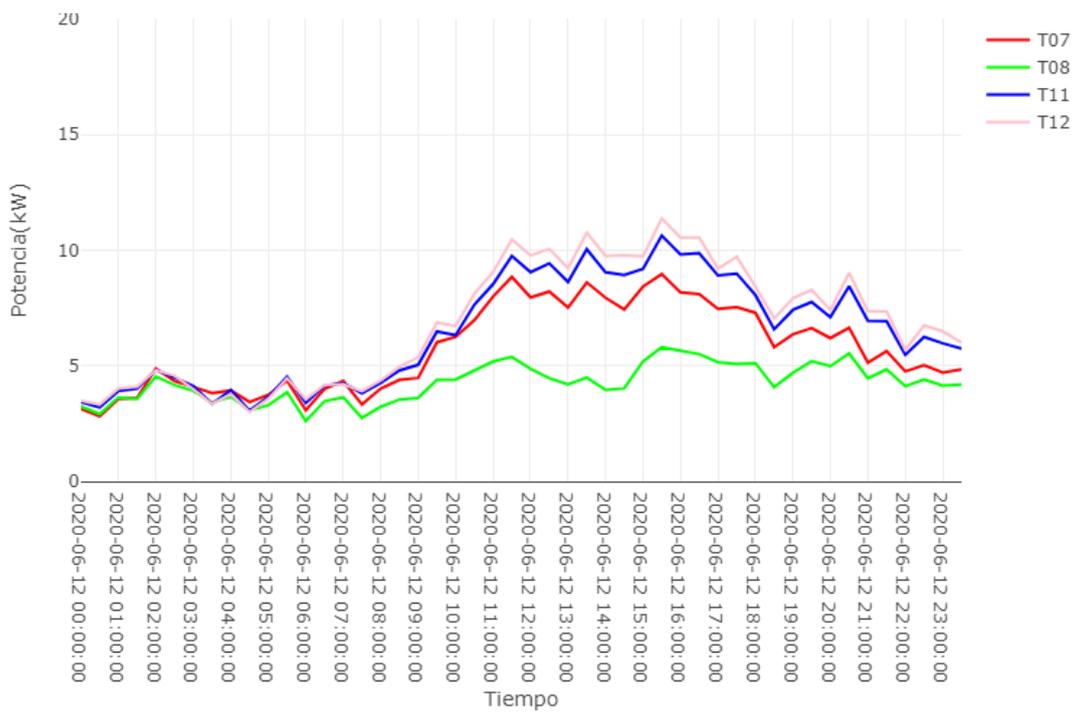


Figura 106. Gráfica del 12 de junio de 2020.

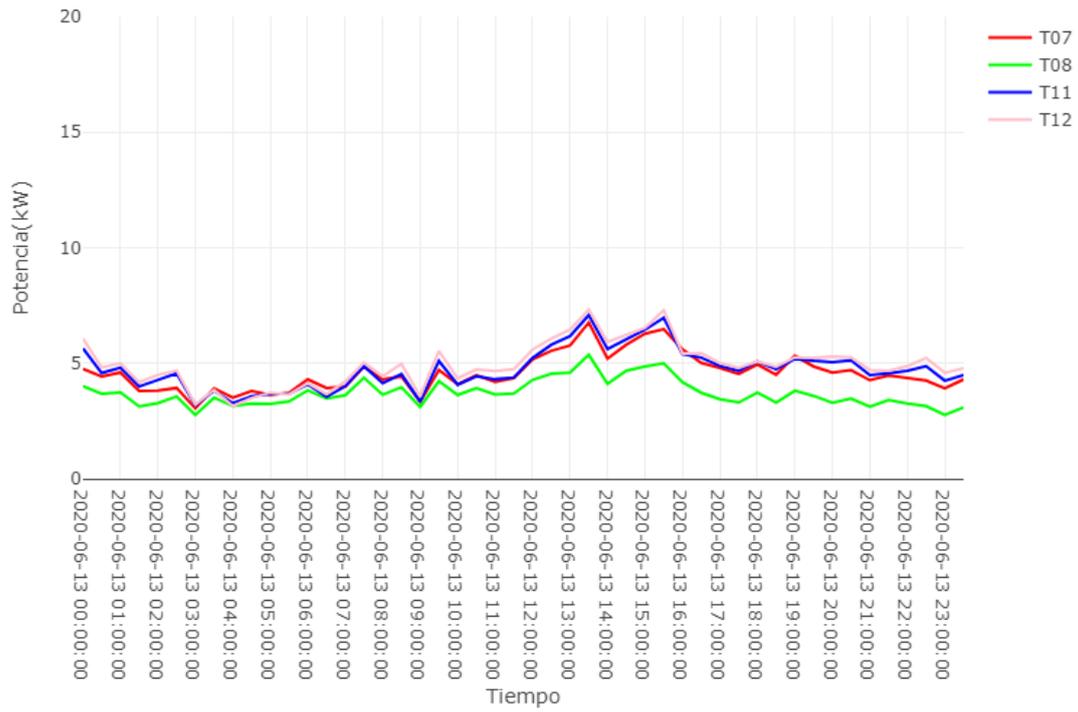


Figura 107. Gráfica del 13 de junio de 2020.

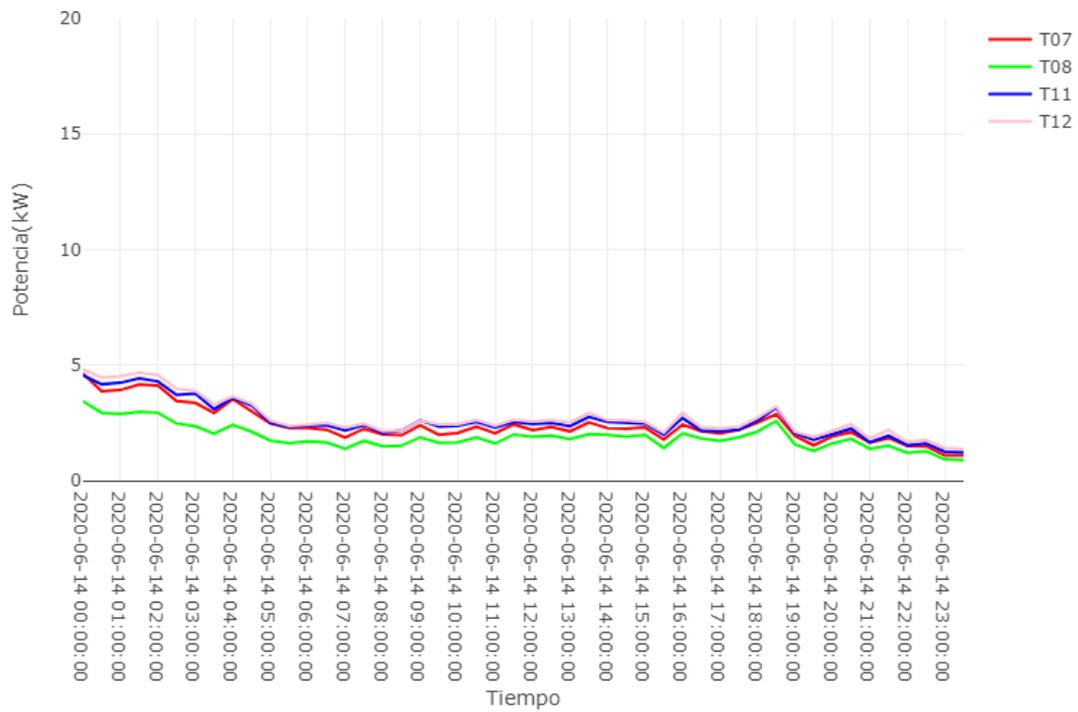


Figura 108. Gráfica del 14 de junio de 2020.

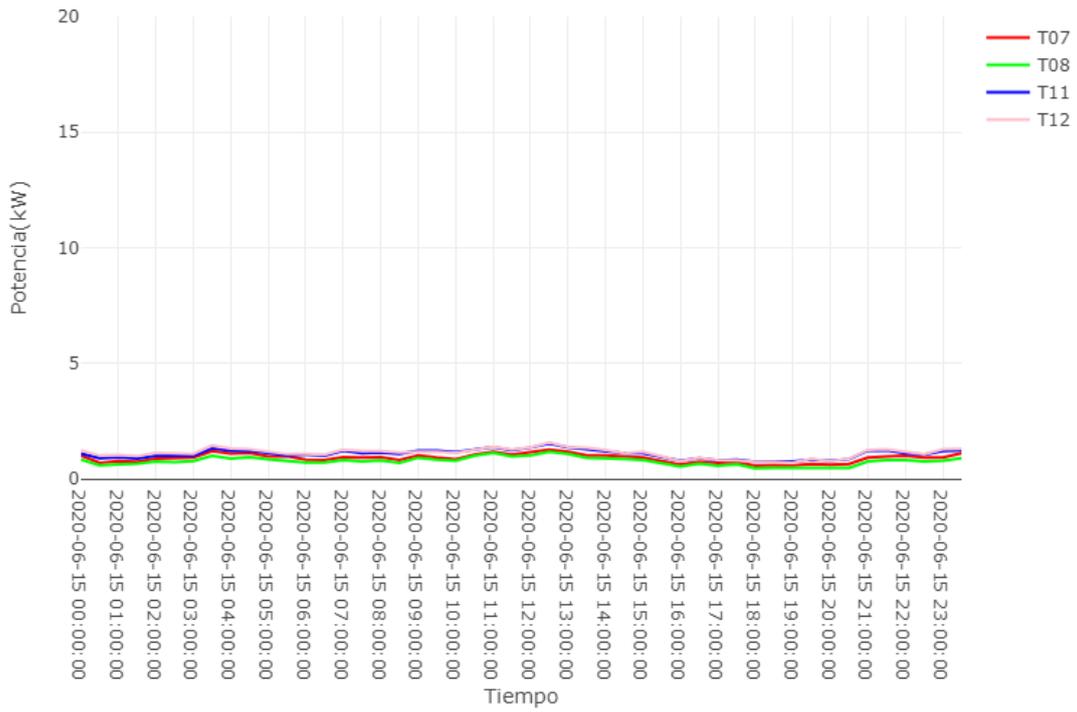


Figura 109. Gráfica del 15 de junio de 2020.

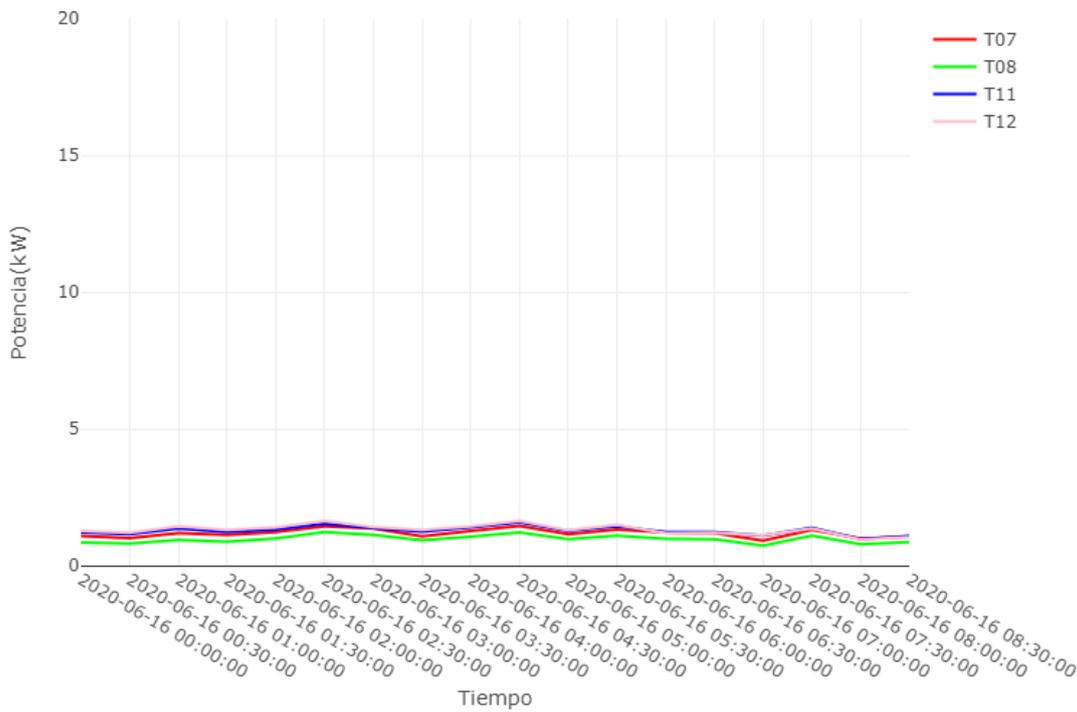


Figura 110. Gráfica del 16 de junio de 2020.

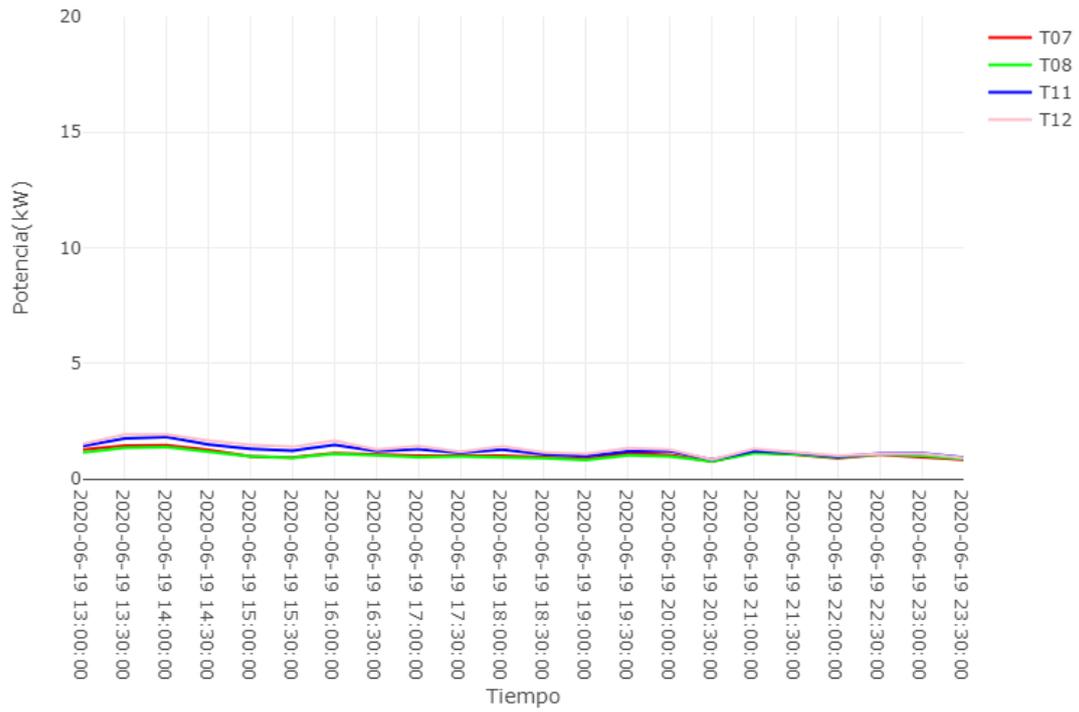


Figura 111. Gráfica del 19 de junio de 2020.

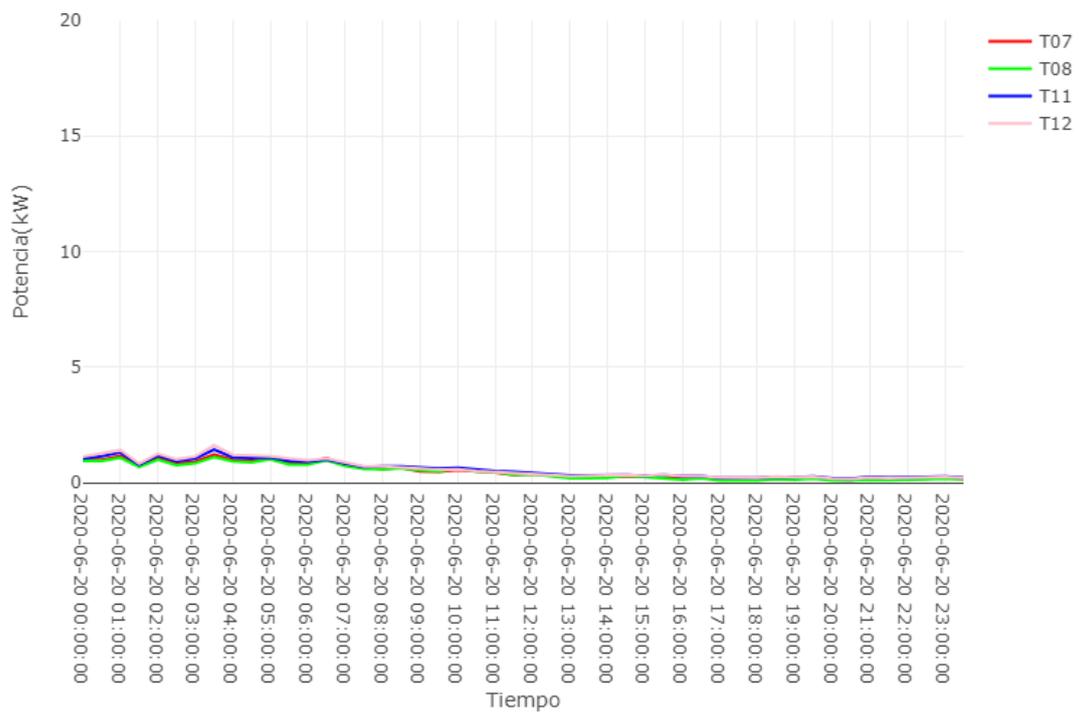


Figura 112. Gráfica del 20 de junio de 2020.

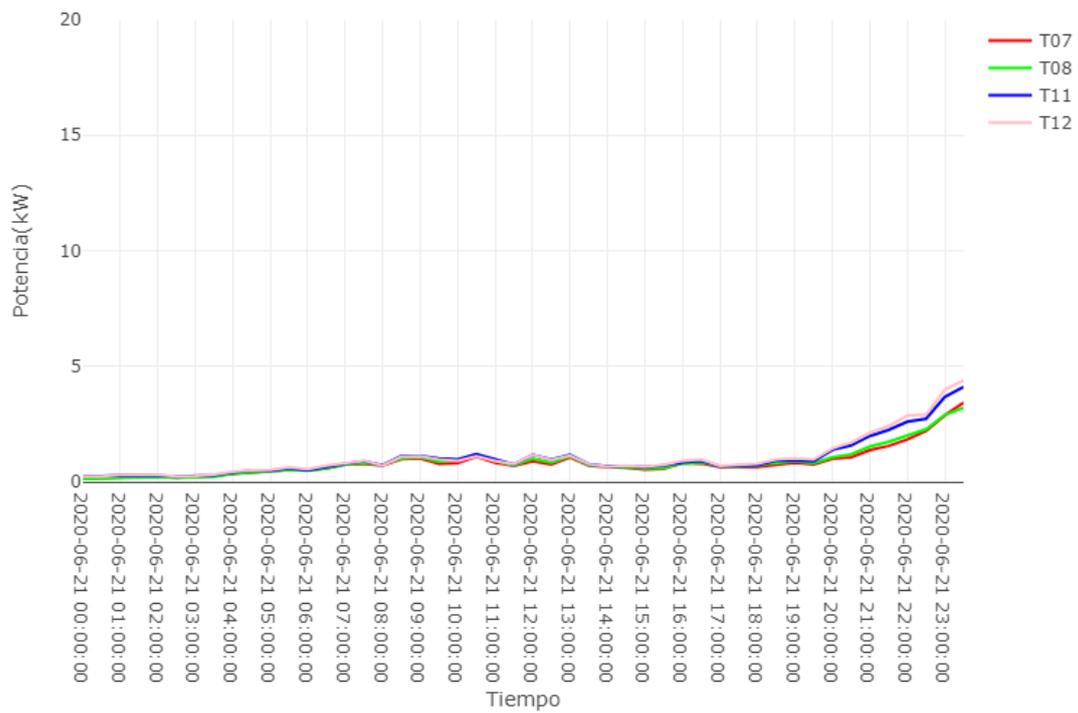


Figura 113. Gráfica del 21 de junio de 2020.

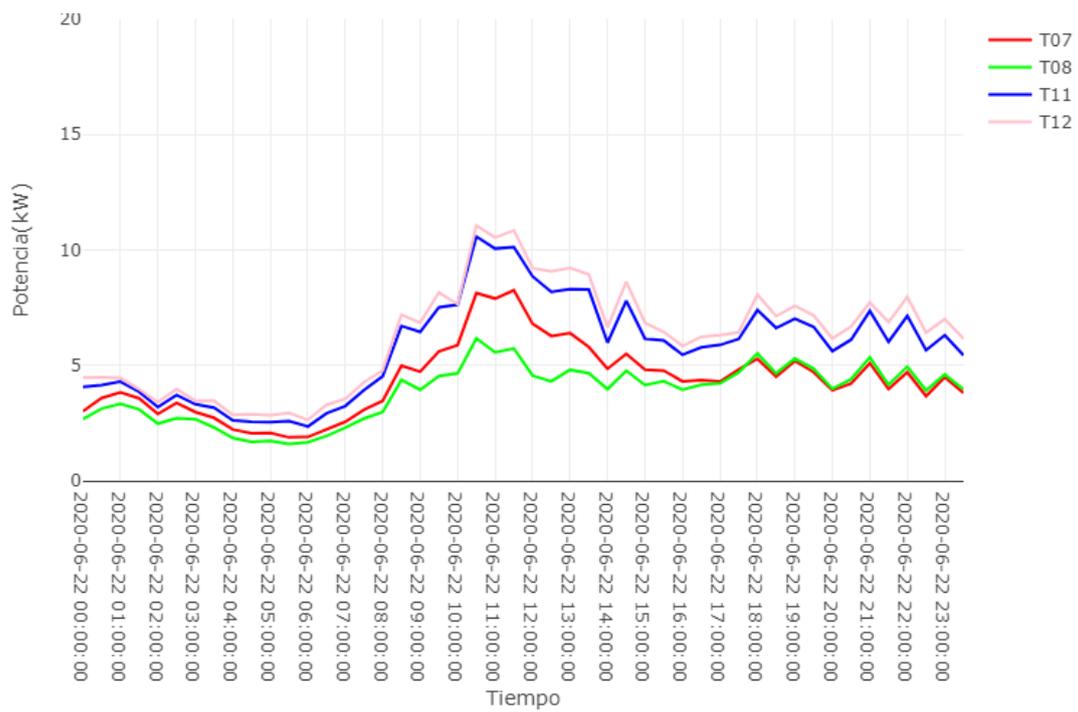


Figura 114. Gráfica del 22 de junio de 2020.

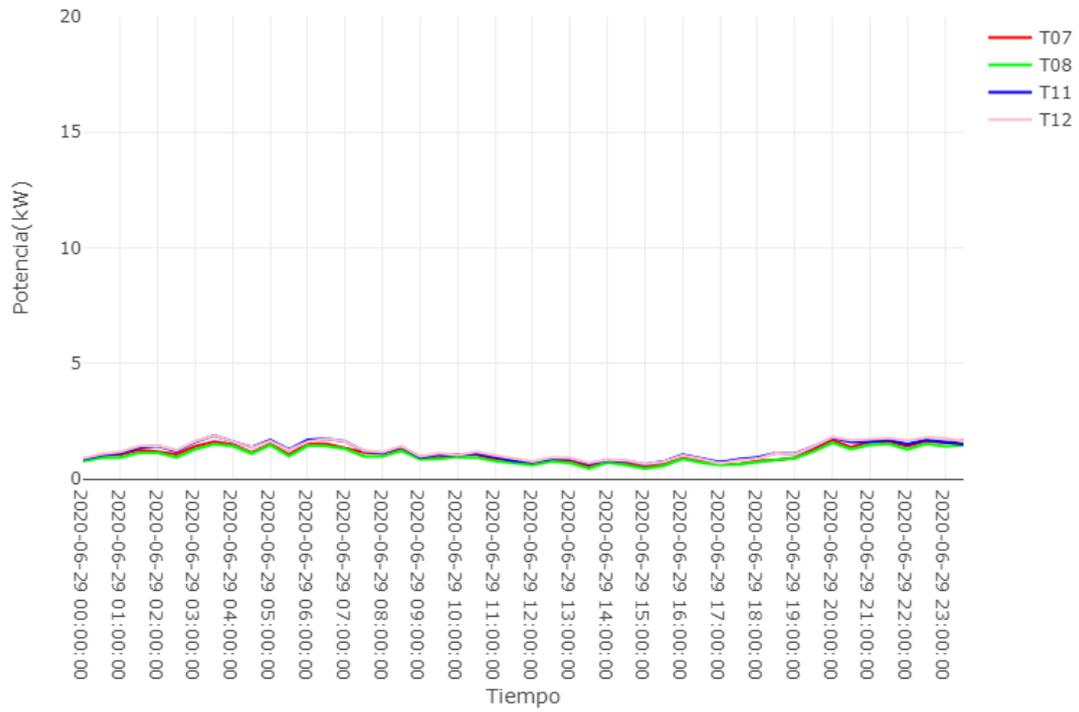


Figura 115. Gráfica del 29 de junio de 2020.

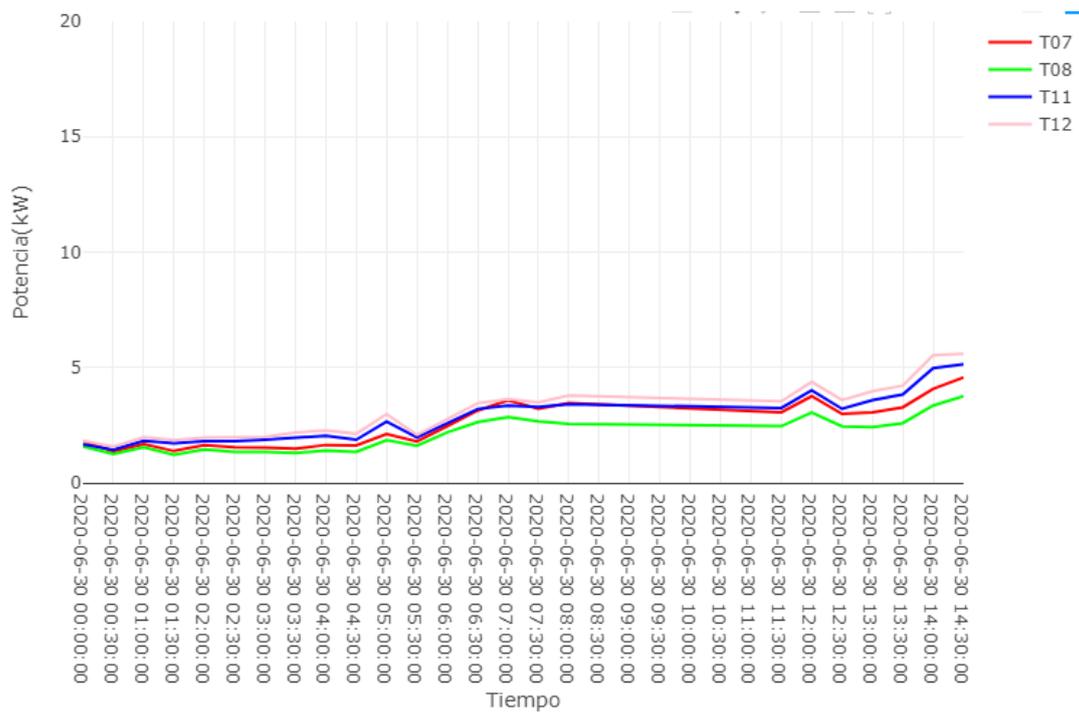


Figura 116. Gráfica del 30 de junio de 2020.