



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

CLIMATOLOGÍA y CARACTERIZACIÓN  
METEOROLÓGICA DE RAMPAS DE  
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN LOS  
PARQUES EÓLICOS DE URUGUAY

Sofía Orteli

Tutor: Dr. Ing. Rafael Terra

*Trabajo final presentado como parte de los requisitos para obtener el Título de Grado de Lic. en Ciencias de la Atmósfera.*

UdelaR- Universidad de la República

Agosto de 2018

---

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA - FACULTAD DE CIENCIAS  
FING-FCIEN

CLIMATOLOGÍA y CARACTERIZACIÓN  
METEOROLÓGICA DE RAMPAS DE  
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EÓLICA EN LOS  
PARQUES EÓLICOS DE URUGUAY

Trabajo final presentado por Sofía Orteli en el cumplimiento de los requisitos para obtener el título profesional de Licenciado en Ciencias de la Atmósfera.

Montevideo, 17 de agosto de 2018

Aprobado por:

---

Prof.

...

---

Prof.

...

---

Prof.

...

# Resumen

---

En el presente trabajo se realizó una descripción de las rampas de viento que ocurren en siete parques eólicos instalados en Uruguay considerando dos años de datos.

El análisis se llevó a cabo con el fin de caracterizar desde el punto de vista meteorológico los eventos de rampa de viento, en especial de las condiciones sinópticas propicias para su desarrollo.

Se realizó un completo proceso de control de calidad de la serie de datos de generación de potencia eólica que consistió en identificar incoherencias en el registro de datos y considerar las operaciones que se realizan en la gestión de la red eléctrica que generan cambios en los registros de datos.

Las rampas de vientos se definen como los cambios de potencia que ocurren en un determinado intervalo de tiempo y que superan un umbral definido. En este trabajo se eligieron intervalos de tiempo de 15', 30' y 60' y un umbral de 20 %, en valor absoluto, relativo a la potencia nominal de cada parque. En la definición de estas variables se tuvo que considerar que la frecuencia de muestreo de los datos era quinceminutal y por lo tanto esa era la principal limitante.

Se analizó el ciclo diurno de las rampas para todos los intervalos de tiempo, para todos los parques y en particular para la unión de todos ellos. También se pudo observar el ciclo diurno para diferentes intervalos de intensidades de rampa. En general se pudo observar que las rampas positivas son más frecuentes en la hora de la tarde, mientras que el máximo diurno de las rampas negativas se da en horas de la madrugada.

Previo a realizar el análisis meteorológico, fue de interés investigar si hay relación en la ocurrencia de rampas en diferentes parques y con qué antelaciones. Se encontró que dicha relación queda definida en función de la distancia a la que se encuentren los mismos y que las antelaciones son siempre menores a 1 hora.

Se definieron eventos de rampas como aquellas situaciones en que ocurren mayor número de rampas en los diversos parques por sobre un umbral y se realizó el análisis meteorológico de los mismos utilizando datos de reanálisis. Se observó una fuerte relación de los pasaje de sistemas frontales que atraviesan el país con los eventos de rampas seleccionados.

---

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Objetivos . . . . .	5
1.1.1. Objetivos Específicos . . . . .	5
1.2. Antecedentes . . . . .	5
1.2.1. Velocidades Medias . . . . .	5
1.2.2. Velocidades Máximas . . . . .	6
1.2.3. Trabajos específicos . . . . .	7
1.2.4. Rampas de viento . . . . .	7
1.3. Organización de la tesis . . . . .	8
<b>2. Datos</b>	<b>10</b>
2.1. Fuente y frecuencia de los datos . . . . .	11
2.2. Control de calidad . . . . .	11
2.3. Re-análisis . . . . .	12
<b>3. Rampas</b>	<b>14</b>
3.1. Definición . . . . .	14
3.2. Análisis exploratorio . . . . .	15

---

3.3. Rampas por parques . . . . .	16
3.3.1. Rampas 15' . . . . .	16
3.3.2. Rampas 30' . . . . .	19
3.3.3. Rampas 60' . . . . .	22
3.4. Rampas conjuntas . . . . .	25
3.4.1. Rampas 15' . . . . .	25
3.4.2. Rampas 30' . . . . .	27
3.4.3. Rampas 60' . . . . .	29
3.5. Consideraciones Finales . . . . .	31
<b>4. Climatología</b>	<b>33</b>
4.1. Ciclo Diurno . . . . .	33
4.1.1. Rampas 15' . . . . .	33
4.1.2. Rampas 30' . . . . .	35
4.1.3. Rampas 60' . . . . .	36
4.2. Rampas Conjuntas . . . . .	38
4.2.1. Rampas 15' . . . . .	38
4.2.2. Rampas 30' . . . . .	39
4.2.3. Rampas 60' . . . . .	41
4.3. Rampas simultáneas . . . . .	44
<b>5. Descripción meteorológica de eventos de rampas de viento</b>	<b>52</b>
5.1. Curva de potencia . . . . .	52
5.2. Selección de eventos de rampa de viento . . . . .	53

---

5.3. Evento 12-01-2016 . . . . .	55
5.4. Evento 01-11-2016 . . . . .	57
5.5. Evento 15-04-2016 . . . . .	59
5.6. Evento 18-03-2016 . . . . .	61
5.7. Evento 19-02-2016 . . . . .	63
5.8. Evento 24-01-2017 . . . . .	65
5.9. Eventos en parque eólico 1 . . . . .	67
5.9.1. Evento 05-10-2016 . . . . .	67
5.9.2. Evento 24-04-2016 . . . . .	69
5.10. Pronóstico de generación eólica . . . . .	70
<b>6. Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>72</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>
<b>Appendices</b>	<b>77</b>
<b>A. Resultados rampas 15'</b>	<b>78</b>
<b>B. Resultados rampas 30'</b>	<b>94</b>
<b>C. Resultados rampas 60'</b>	<b>110</b>

## Índice de tablas

3.1. Cantidad de rampas de viento que fueron seleccionadas por intervalo de tiempo. Serie original quinceminutal de dos años. . . . .	31
4.1. Valores normalizados de amplitud y fase del primer armónico, para rampas negativas y positivas por intervalo de tiempo. . . . .	44
4.2. Rampas horarias positivas simultáneas. Cantidades en porcentajes y en número de casos. . . . .	45
4.3. Rampas horarias negativas simultáneas. Cantidades en porcentajes y en número de casos . . . . .	46
4.4. Distancia relativa de los parques eólicos en km. . . . .	47
4.5. Distancia relativa de los parques eólicos en km y desvío estándar en minutos de la simultaneidad de las rampas. . . . .	51
4.6. Distancia relativa de los parques eólicos en km y mediana en minutos de la simultaneidad de las rampas. . . . .	51

# Índice de figuras

1.1. Ejemplo de curva de potencia de un aerogenerador. . . . .	4
2.1. Ubicación de parques eólicos seleccionados para el estudio de rampas de viento. . . . .	10
3.1. Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	17
3.2. Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	17
3.3. Scatter plot de rampas 15' por parque. Serie original vs serie filtrada. En rojo recta $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada. . . . .	18
3.4. Histograma de ocurrencia de las rampas de 15' que fueron seleccionadas por parque eólico. . . . .	19
3.5. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cuatro puntos. . . . .	20
3.6. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cuatro puntos. . . . .	20
3.7. Scatter plot de rampas 30' por parque. Serie original vs serie filtrada. En rojo recta $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada. . . . .	21

---

3.8. Histograma de ocurrencia de las rampas de 30' que fueron seleccionadas por parque eólico. . . . .	22
3.9. Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cinco puntos. . . . .	23
3.10. Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cinco puntos. . . . .	23
3.11. Scatter plot de rampas 60' por parque. Serie original vs serie filtrada. En rojo recta $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada. . . . .	24
3.12. Histograma de ocurrencia de las rampas de 60' que fueron seleccionadas por parque eólico. . . . .	25
3.13. Scatter plot de rampas 15'. Serie original vs serie filtrada. Puntos azules corresponden a las rampas en los siete parques. En rojo recta $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada. . . . .	26
3.14. Histograma de ocurrencia de las rampas de 15' que fueron seleccionadas para los siete parques. . . . .	27
3.15. Scatter plot de rampas 30'. Serie original vs serie filtrada. Puntos azules corresponden a las rampas en los siete parques. En rojo recta $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada. . . . .	28
3.16. Histograma de ocurrencia de las rampas de 30' que fueron seleccionadas para los siete parques. . . . .	29
3.17. Scatter plot de rampas 60'. Serie original vs serie filtrada. Puntos azules corresponden a las rampas en los siete parques. En rojo recta $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada. . . . .	30
3.18. Histograma de ocurrencia de las rampas de 60' que fueron seleccionadas para los siete parques. . . . .	31
4.1. Ciclo diurno de rampas de 15' en cada parque eólico. . . . .	34

---

---

4.2. Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	34
4.3. Ciclo diurno de rampas de 30' en cada parque eólico. . . . .	35
4.4. Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	36
4.5. Ciclo diurno de rampas de 60' en cada parque eólico. . . . .	37
4.6. Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	37
4.7. Ciclo diurno de rampas de 15' para el total de los parques eólicos. . . . .	38
4.8. Ciclo diurno de rampas 15' para el total de los parques por intervalo de intensidad de rampa. . . . .	39
4.9. Ciclo diurno de rampas de 30' para el total de los parques eólicos. . . . .	40
4.10. Ciclo diurno de rampas 30' para el total de los parques por intervalo de intensidad de rampa. . . . .	41
4.11. Ciclo diurno de rampas de 60' para el total de los parques eólicos. . . . .	42
4.12. Ciclo diurno de rampas 60' para el total de los parques por intervalo de intensidad de rampa. . . . .	43
4.13. Cantidad de rampas positivas. . . . .	46
4.14. Cantidad de rampas negativas. . . . .	47
4.15. Ubicación de parques eólicos seleccionados para el estudio de rampas de viento. . . . .	48
4.16. Simultaneidad de las rampas positivas entre los parques más próximos. . .	49
4.17. Simultaneidad de las rampas negativas entre los parques más próximos. . .	50
5.1. Curva de potencia característica de un parque eólico de Uruguay. . . . .	53

---

---

5.2. Evento de rampas horarias del 12-01-2016. Fechas en hora GMT. Pronóstico de potencia en linea naranja. . . . .	55
5.3. Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT. . . . .	55
5.4. Evento de rampas horarias del 01-11-2016. Fechas en hora GMT. . . . .	57
5.5. Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT. . . . .	57
5.6. Evento de rampas horarias del 15-04-2016. Fechas en hora GMT. . . . .	59
5.7. Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT. . . . .	59
5.8. Evento de rampas horarias del 18-03-2016. Fechas en hora GMT. . . . .	61
5.9. Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT. . . . .	61
5.10. Evento de rampas horarias del 19-02-2016. Fechas en hora GMT. . . . .	63
5.11. Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT. . . . .	63
5.12. Evento de rampas horarias del 24-01-2016. Fechas en hora GMT. . . . .	65
5.13. Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT. . . . .	65
5.14. Evento de rampas horarias del 05-10-2016 en el parque eólico 1. Fechas en hora GMT. . . . .	67
5.15. Campos de presión y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.	68
5.16. Evento de rampas horarias del 24-04-2016 en el parque eólico 1. Fechas en hora GMT. . . . .	69
5.17. Campos de presión y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.	69

---

---

5.18. Evento de rampas horarias del 12-01-2016 junto con el pronóstico de generación de potencia eólica. . . . .	70
A.1. Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	79
A.2. Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	79
A.3. Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	80
A.4. Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	81
A.5. Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	82
A.6. Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	83
A.7. Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	84
A.8. Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	85
A.9. Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	85
A.10. Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	86
A.11. Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	86
A.12. Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	87

---

---

A.13.Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	87
A.14.Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	88
A.15.Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	89
A.16.Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	89
A.17.Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	90
A.18.Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	91
A.19.Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	91
A.20.Ciclo diurno de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	92
A.21.Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	93
A.22.Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	93
B.1. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	95
B.2. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	95
B.3. Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	96

---

---

B.4. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	97
B.5. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	97
B.6. Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	98
B.7. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	99
B.8. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	100
B.9. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	100
B.10. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	101
B.11. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	101
B.12. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	102
B.13. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	102
B.14. Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	103
B.15. Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	104
B.16. Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	104

---

---

B.17.Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	105
B.18.Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	106
B.19.Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	107
B.20.Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	108
B.21.Ciclo diurno de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	109
C.1. Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	111
C.2. Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	111
C.3. Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	112
C.4. Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	113
C.5. Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	113
C.6. Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	114
C.7. Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	115
C.8. Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	115

---

---

C.9. Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	116
C.10.Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	117
C.11.Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	117
C.12.Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	118
C.13.Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	118
C.14.Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	119
C.15.Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	119
C.16.Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	120
C.17.Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	121
C.18.Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	122
C.19.Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	123
C.20.Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos. . . . .	123
C.21.Ciclo diurno de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa. . . . .	124

---

---

C.22.Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con  
filtro binomial de tres puntos. . . . . 125

# Capítulo 1

## Introducción

El presente trabajo corresponde al Trabajo Final de la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera, el cual tiene como objetivo caracterizar desde el punto de vista meteorológico los eventos de rampa de viento registrados en algunos parques eólicos de Uruguay.

La tendencia mundial muestra que la demanda de energía va en aumento, y por lo tanto se está cambiando el tipo de producción de energía para abastecer dicha demanda. En los últimos años aumentó significativamente la participación de las energías renovables no convencionales, en particular de la energía eólica. Uruguay ha logrado en los últimos 10 años convertirse en el país con mayor proporción de electricidad generada a partir de energía eólica en América Latina y uno de los principales en términos relativos a nivel mundial. En el año 2017, la participación de la energía eólica fue del 30.64 % (UTE, ), de la energía producida en el país. Una mejor comprensión de la producción de energía eólica según la estación y hora del día es útil para gestionar la red eléctrica.

Uno de los principales problemas del uso de la energía eólica es que, debido a la variación aleatoria del viento, la potencia generada puede variar de manera brusca, lo que puede provocar cambios no deseados en la tensión y la corriente del sistema eléctrico que pueden llevar al mismo a perder estabilidad. Estos eventos, conocidos como rampas, consisten en aumentos o disminuciones considerables del recurso eólico (de su velocidad) en periodos relativamente cortos de tiempo.

En los parques eólicos se han instalado diferentes aerogeneradores que utilizan la energía cinética del viento para girar las hélices generando energía mecánica y luego con un alternador se genera energía eléctrica. Los mismos se caracterizan por una curva de

potencia que se determina registrando mediciones simultáneas de la velocidad del viento y la potencia de salida en el sitio de prueba durante un período lo suficientemente prolongado como para establecer una base de datos estadísticamente significativa en un rango de velocidades del viento y en condiciones atmosféricas variables, ver (61400-12-1., ). El resultado final es una función cúbica que se ajusta a los datos como se muestra en la Figura 1.1.

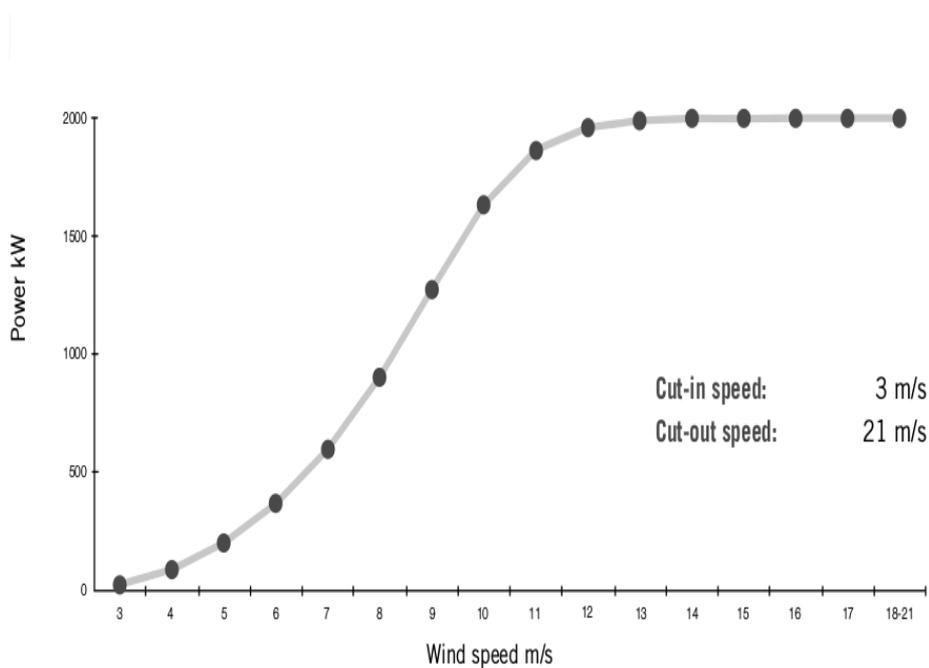


Figura 1.1: Ejemplo de curva de potencia de un aerogenerador.

Dado que la potencia que se puede generar en base al viento depende directamente del módulo de su velocidad, las rampas de viento están asociadas a las velocidades que se encuentra en la zona de mayor pendiente de la curva del aerogenerador.

Las rampas de viento tienen gran repercusión en la operación de los sistemas eléctricos en los que esté presente la generación en base eólica. Los operarios del sistema deben tomar decisiones sobre cómo gestionar la generación eólica para que la red no se vea dañada y la demanda sea abastecida correctamente.

Por esta razón nos vemos motivados de realizar en este trabajo una clasificación y caracterización meteorológica de las rampas de viento, en especial de las condiciones sinópticas propicias para su desarrollo y del tipo de eventos que es de esperar en cada situación.

---

## 1.1. Objetivos

Nos planteamos como objetivo general identificar y describir las condiciones meteorológicas conducentes a los eventos de rampas de viento ocurridas en siete parques eólicos durante el período 2015-2017.

### 1.1.1. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Describir la climatología de rampas de viento en Uruguay. Se trabajará con más de un valor de los parámetros clave para definir una rampa: intensidad y duración. Se describirán las variaciones diurnas de la tasa de ocurrencia de cada tipo de rampa durante el período bajo estudio.
- Clasificar los eventos de rampa según la situación sinóptica, representada por los campos regionales de velocidad de viento y presión en superficie de re-análisis. Determinar el tipo de rampa y el patrón espacial de las mismas en función de dicha clasificación.
- Estudiar un caso particular y extremo con más detalle a partir de la información meteorológica disponible, analizando en particular la predictibilidad del mismo en función de la antelación.

## 1.2. Antecedentes

Los trabajos que se han desarrollados en Uruguay en relación a la variabilidad del viento consideran velocidades medias y velocidades máximas o eventos extremos.

En relación a las rampas de viento no existen estudios en Uruguay y por lo tanto se ha realizado una búsqueda de trabajos internacionales.

### 1.2.1. Velocidades Medias

En relación a las velocidades medias, Morandi ha estudiado en varias oportunidades los registros de viento del Observatorio del Prado (Servicio Meteorológico del Uruguay). En el año 1940 (Morandi, 1940) con el objetivo de estudiar el comportamiento del viento para una mejor explotación de la energía eólica en el Uruguay analizó la serie de datos

de 1906 - 1923, donde observó la dirección prevalente del viento y la rotación diaria del mismo. Encontró que el promedio anual de la velocidad media del viento es de 3.9 m/s y que la primavera registra velocidades medias más altas. Define los vientos impetuosos en Montevideo como aquellos que tengan velocidades mayores a 13 m/s y encuentra que solamente 0.8 % de las horas registradas tuvieron vientos mayores a 47 km/hr, con mayor frecuencia en invierno y menor frecuencia en verano. La dirección prevalente de estos casos es del Sur al Oeste (tercer cuadrante). En este trabajo también describe las calmas relativas interhorarias en el rango de 0 m/s a 4.2 m/s, las cuales tienen una frecuencia máxima principal en las últimas horas de la madrugada, 5am, y una frecuencia mínima principal alrededor de las 14hrs. Concluye que el clima en Uruguay brinda una proporción elevada de horas aprovechables para el uso de los aeromotores.

(Morandi, 1945) vuelve a estudiar la frecuencia de las velocidades horarias del viento durante el quinquenio 1936-1940 registradas en el Observatorio del Prado. Determinó que el 75 % de las horas estudiadas en el quinquenio superaron los 10 km/hr, velocidad en que los aeromotores comienzan a funcionar. Un porcentaje muy pequeño de estos casos supera los 50 km/hr, velocidades que se consideran peligrosas para el funcionamiento de los aeromotores. También observó que las horas diurnas tienen mayores velocidades que las nocturnas.

Como trabajo más reciente podemos citar (Cataldo, J., 2010), que desarrolló el mapa de vientos de Uruguay trabajando con velocidades medias. Fue desarrollado por la Facultad de Ingeniería, a través de un convenio con el (Programa de Energía Eólica de Uruguay (PEEU), 2009). Su confección permite la visualización del clima de vientos en todo el territorio, dando lugar a la identificación de zonas con mayor recurso y a la caracterización del clima de vientos.

### **1.2.2. Velocidades Máximas**

Otros autores han trabajado con las velocidades máximas o eventos extremos, por ejemplo, (Vieira, 1969) caracteriza las principales condiciones sinópticas cuando se registraron eventos de viento extremo en algunas localidades de Uruguay. (Hernández, 1971) presenta un análisis de las velocidades máximas de ráfagas de viento medidas en la estación de Antepuerto entre 1906 y 1969. (Ricaldoni, 1979) presenta la base para el estudio de los vientos máximos en Uruguay para el desarrollo del código nacional del viento UNIT: 50-84, 1984, describiendo un mapa isoviento estimado para el Uruguay. Los trabajos más

recientes son los de (Durañona, 015b) donde encuentra que las tormentas convectivas intensas dominan el clima de vientos extremos. Las velocidades más intensas se encuentran más frecuentemente hacia el noroeste del país, e identifica una clara tendencia estacional en las velocidades de ráfaga como en las velocidades medias en 10min, con valores más altos entre octubre y marzo, y sobre todo en noviembre y febrero, coincidiendo con el comportamiento de la actividad convectiva severa en la región. También verifica que tanto las tormentas convectivas intensas como los eventos de viento intenso de escala sinóptica producen sus vientos más fuertes del cuadrante suroeste.

### 1.2.3. Trabajos específicos

Existen otros trabajos desarrollados en el país con un fin específico. (Barros, 1986), participó en el proyecto PNUD/OMM/URU/82/021 “Información meteorológica básica para el aprovechamiento de la energía solar y eólica”. Se buscaba describir el régimen de viento y sus características estadísticas para la toma de decisiones previas al uso del viento como recurso energético. Se trabajó con promedios mensuales de mediciones de viento de estaciones meteorológicas de la DNM (Dirección Nacional de Meteorología). Se desarrollaron los mapas de intensidad de viento de los cuales se destaca que durante casi todo el año prevalecen menores vientos hacia el Norte y hacia el Este. Los mapas de energía no se pudieron desarrollar debido a la calidad de los datos; como la energía es proporcional al cubo del módulo de la velocidad, su determinación llevaría a tener errores del orden del 70 %. Finalmente, se concluye que la energía eólica puede constituir una fuente interesante de energía en el Uruguay.

### 1.2.4. Rampas de viento

No existen estudios previos en el país en relación a las rampas de viento, por lo tanto, se realizó una búsqueda bibliográfica extendiéndose a otros países.

Un evento de rampa queda determinado por una diferencia de potencia en función de la potencia instalada durante un período de tiempo. En relación a esto existen varias definiciones que se pueden implementar dependiendo del funcionamiento del sistema eléctrico a estudiar. En el año 2008, la consultora AWS Truewind, LLC analizó los eventos de rampa de viento en el oeste de Texas para la empresa General Electric Energía Eólica. Documentaron los eventos meteorológicos que causaron las rampas en los años 2005 - 2006, y un evento puntal del 2007. (AWS Truewind, 2008) Consideran los eventos de rampa como aquellos que provocan un cambio en el 20 % de la producción en un tiempo de 30 minu-

tos. Se analizaron datos meteorológicos de superficie (NCDC), perfiles de viento (NOAA), datos meteorológicos de estaciones de superficie (ASOS) cercanas a los parques eólicos, imágenes de satélites visibles e infrarrojas (NOAA), datos de radar Doppler y los datos de la planta ERCOT para examinar la variabilidad espacial y temporal de los forzantes meteorológicos asociados con cada evento de rampa.

Masamichi (Ohba, 2015) estudió los patrones de circulación sinóptica en los eventos de rampa de viento en el este de Japón utilizando la técnica de mapas auto-organizados SOM, self-organizing maps. En este caso, se consideraron los eventos de rampa de energía eólica a los cambios en el 30 % de la potencia en menos de 6 horas. Se observa que los eventos de rampa se producen principalmente durante los meses de invierno en el este de Japón y se definen siete patrones sinópticos vinculados a estos eventos de rampa de viento. Se concluye que una clasificación detallada de los patrones de circulación sinóptica puede ser una herramienta útil para aproximaciones de primer orden tanto de la probabilidad de generación de energía eólica como de su variabilidad.

(Bianco, 2016) desarrolla una herramienta de rampa y métrica (RT&M) para evaluar la capacidad de un modelo para pronosticar eventos de rampa sobre una serie temporal de potencia para la energía del viento. La (RT&M) tiene tres componentes: identificación de los eventos de rampa de viento, sincronización de las previsiones y las rampas observadas, y finalmente calcula una puntuación de habilidad para los pronósticos. La herramienta es flexible y puede ser modificada por los usuarios para sus propósitos. El modelo actualizado funciona operativamente sobre América del Norte en la resolución de 13 kilómetros, y fue utilizado durante la campaña 2011-2013 de WFIP.

### **1.3. Organización de la tesis**

La tesis está organizada en 6 capítulos, incluido el capítulo actual, Capítulo 1, que presenta el problema de estudio, la motivación y los objetivos. También se presenta una revisión bibliográfica en relación a la variabilidad del viento en Uruguay, estudios sobre el potencial eólico en el país, y literatura internacional sobre las rampas de viento.

El Capítulo 2 describe el procesamiento de los datos, tanto en lo que tiene que ver con su fuente de generación como con el control de calidad de los mismos. Se describen los datos meteorológicos de re-análisis disponibles para el estudio meteorológico de los eventos de rampa de viento y se presenta el pronóstico operativo de generación de energía

---

eólica en Uruguay.

El Capítulo 3 presenta el análisis exploratorio que se realizó para definir la serie de rampas de viento en los diferentes parques eólicos que luego se analizarán en el Capítulo 4 y 5.

Una vez que se define la serie de rampas para los diferentes intervalos de tiempo, se describe en el Capítulo 4 el ciclo diurno de las mismas, para cada parque eólico, para diferentes intensidades de rampas y considerando la unión de todos los parques. También en este capítulo se busca identificar si existe cierta simultaneidad de la ocurrencia de las rampas entre los diferentes parques eólicos.

Luego de ver el ciclo diurno de las rampas e identificar la simultaneidad de las mismas entre los parques, se definen los eventos a estudiar desde el punto de vista meteorológico, cuya descripción se realiza en el Capítulo 5.

Finalmente en el Capítulo 6 se comentan los problemas identificados, las principales conclusiones de la investigación y el trabajo futuro.

## Capítulo 2

### Datos

Para identificar los eventos de rampa de viento se utilizaron los datos de generación de potencia eólica de siete parques eólicos, cinco ubicados al sur del Río Negro, uno en el centro del país y el otro restante en el norte del país. La ubicación de los mismos se puede ver en la Figura 2.1. La serie de datos inicia el 14 de abril de 2015 y se completaran dos años. La potencia nominal de estos siete parques es de 397.2 MW.

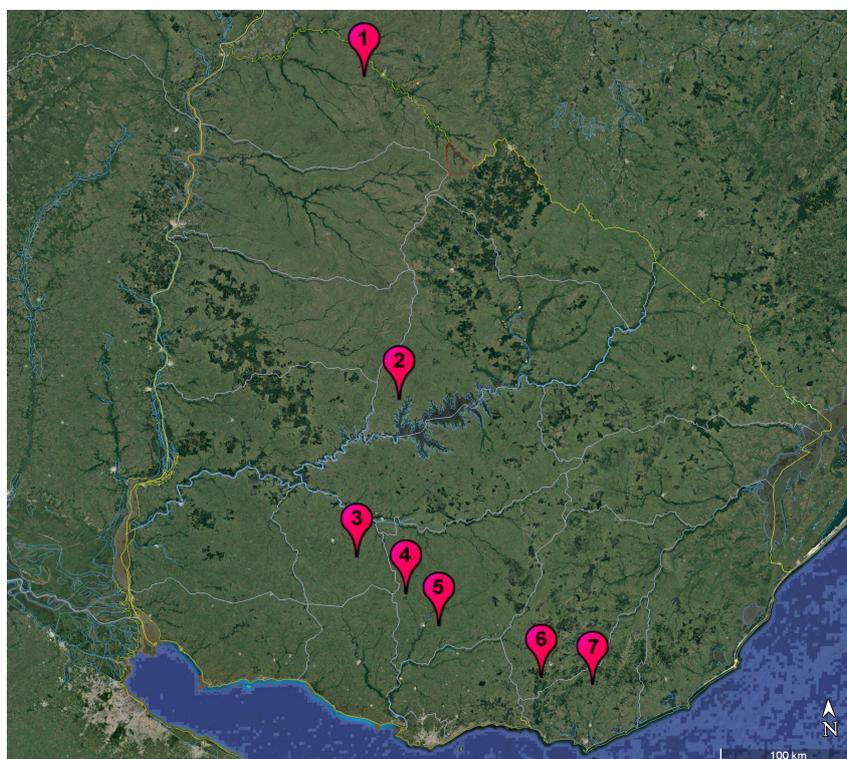


Figura 2.1: Ubicación de parques eólicos seleccionados para el estudio de rampas de viento.

---

## 2.1. Fuente y frecuencia de los datos

Los datos de generación eólica se registran en el Sistema de Medición Comercial, (SMEC), el cual se utiliza para las transacciones de energía en cada nodo en que se inyecta o retira energía de la red. Los componentes del SMEC son un sistema de medición de energía activa y reactiva en los nodos y un centro de recolección de mediciones. Cada parque eólico cuenta con medición de inyección y retiro de energía activa por unidad de generación.

Para realizar el control de calidad a los datos se deben considerar dos variables, disponibilidad y restricciones operativas. La primera se define como la cantidad de aerogeneradores efectivamente disponibles en cada momento. Las restricciones operativas se refieren a que en cada momento se asigna una potencia, a cada parque eólico, que puede inyectar a la red del sistema eléctrico. Generalmente se permite que toda la energía producida por el parque eólico sea inyectada en la red. Sin embargo, a veces esta asignación de potencia impone un límite en la potencia que se puede inyectar en la red. En estos casos decimos que el parque eólico tiene una restricción operativa. El límite que se impone es variable y se determina en cada caso, según consideraciones del operador con respecto al sistema eléctrico en su conjunto. Estos datos se obtienen del SCADA, (Supervisory Control And Data Acquisition).

El registro de datos en el SMEC es quinceminutal u horario. El SCADA puede proporcionar la frecuencia que desee el usuario, en este caso quinceminutal y se consulta el dato registrado en ese minuto. Se seleccionaron los parques eólicos que cuentan con un registro histórico de dos años que consideramos suficiente para el estudio a realizar.

## 2.2. Control de calidad

El control de calidad que se realizó a los datos de generación consiste en:

- Corregir la potencia por disponibilidad. En los casos en que la disponibilidad de aerogeneradores en el parque no sea total, la potencia se corrige, utilizando una estimación de la potencia que se hubiera generado en caso de tener plena disponibilidad. Esta estimación se realiza aplicándole a la potencia observada un factor de potencia disponible sobre potencia total instalada del parque (extrapolación lineal).
- En los instantes que se impusieron restricciones operativas al parque, el dato de

potencia se verá afectado de una manera que no se puede vincular directamente con la disponibilidad de aerogeneradores del parque, por lo cual no consideramos estos casos.

- Los datos del SMEC son los más confiables que existen en relación a la generación de los parques, mientras que los datos del SCADA, en particular la disponibilidad, pueden tener problemas en su registro y por lo tanto pueden ocurrir las siguientes situaciones:
  - Disponibilidad nula, pero la generación no nula: la potencia corregida es infinita. Estos casos los eliminamos.
  - Disponibilidad muy pequeña puede generar potencia corregida mayor a la nominal. Estos casos también los debemos eliminar.
  - Disponibilidad negativa, no se consideran como datos confiables y se eliminan.

## 2.3. Re-análisis

En relación a los datos meteorológicos, consideraremos los campos de presión y viento en superficie, en 1000mb, del Proyecto de Intercomparación de Modelos Atmosféricos NCEP-DOE (AMIP-II) Reanalysis 2.(Kanamitsu, 2002).

Este proyecto se basa en un sistema de análisis/previsión que realiza la asimilación de datos utilizando datos pasados desde 1979 hasta el presente y utiliza un modelo de pronóstico actualizado, un sistema actualizado de asimilación de datos, resultados de diagnóstico mejorados y soluciones para los problemas de procesamiento conocidos del NCEP- Reanálisis de NCAR.

Estos datos tienen una resolución espacial de  $2.5^\circ$  y están disponible como promedios diarios y 4 veces al día. En este trabajo para realizar la descripción meteorológica de los eventos de rampa de viento, se eligió un dominio que permita identificar los eventos de escala sinóptica. El dominio es  $[15^\circ\text{S}-55^\circ\text{S};75^\circ\text{O}-35^\circ\text{O}]$ .

Para un evento en particular, se presentará, el pronóstico operativo de potencia de generación eólica en cada parque eólico para ver cómo es el comportamiento de las rampas de viento. (S. de Mello, 2015)

Desde el año 2015, existe un convenio entre Facultad de Ingeniería y la UTE con el

---

---

fin de desarrollar pronósticos de energía eólica. Desde entonces se generan pronósticos periódicamente, a partir de simulaciones del modelo The Weather Research and Forecasting (WRF), que utilizan información global; generada por el modelo de circulación general de la atmósfera NOAA/ National Weather Service National Centers for Environmental Prediction.

El pronóstico que se muestra en este trabajo, considera la asimilación de potencia en tiempo real, la discriminación de los estados de estabilidad atmosférica, el efecto de la densidad del aire en la producción de los aerogeneradores y dos salidas simultaneas con diferentes esquemas numéricos de la capa límite atmosférica, de modo de disponer de un mejor indicador de la incertidumbre.

# Capítulo 3

## Rampas

### 3.1. Definición

Existen deferentes definiciones de rampas, en este trabajo se eligió la definición que dice que una rampa ocurre cuando hay un cambio en la potencia que supera un umbral en un intervalo de tiempo determinado.

$$\left| \frac{\Delta(P)}{\Delta(t)} \right| \geq P_{umbral} \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta el funcionamiento del Despacho de Cargas las rampas de viento que son de interés para la gestión del mismo quedan condicionadas al tiempo que tarda en prenderse la máquina más rápida que tenga el sistema en caso que se pierda potencia por la ocurrencia de las rampas hacia abajo y se deba abastecer la demanda.

Considerando que los datos de generación de potencia tienen una frecuencia de registro quinceminutal, los intervalos de tiempo que decidimos trabajar para definir las rampas de viento son 15, 30 y 60 minutos, escalas que entendemos son de aplicación en la gestión del Despacho y que nos permitirán realizar la descripción meteorológica de las mismas. En relación al umbral a trabajar, en principio se determina que las rampas menores a 20% en valor absoluto no tienen aplicación en este trabajo.

---

## 3.2. Análisis exploratorio

En esta sección explicaremos como definimos la serie de rampas para los diferentes intervalos de tiempo.

Se calcularon inicialmente todas las rampas para cada intensidad (y signo) y para cada parque, lo que nos permite conocer la distribución de las mismas.

Un primer criterio de selección consistió en considerar solo aquellas rampas que cuentan con datos válidos (y que sobrevivieron el control de calidad previamente mencionado) en un entorno de las mismas, de modo de poder conocer la evolución del viento inmediatamente antes y después. Dicho entorno se tomó de dos horas para las rampas de 15 minutos y de 3 horas para las rampas de 30 y 60 minutos.

Comenzamos visualizando gráficamente las rampas más grandes en valor absoluto en todos los parques. Esto nos permitió conocer las rampas en relación a su intensidad y la cantidad de las mismas que pueden ocurrir en cada parque.

De la inspección de las series de potencia surge que las mismas contienen variabilidad de alta frecuencia, hasta la frecuencia quinceminutal de muestreo. Considerando que obviamente las oscilaciones en la frecuencia de muestreo no están bien capturadas (efecto de aliasing) y que es de interés retener aquellas rampas (crecientes o decrecientes) que se mantienen en un cierto período de tiempo, se procedió a filtrar las series brutas.

Realizando una inspección visual de las series de potencia se decidió definir filtros binomiales de tres, cuatro y cinco puntos, para las rampas de 15, 30 y 60 minutos, respectivamente. De esta manera, se tienen dos series de potencia, la original y la filtrada.

Como segundo criterio de selección se retuvo solo aquellas rampas de la serie original que mantenían cierta amplitud en la serie filtrada, descartando aquellas cuya amplitud es mayormente explicada por la muy alta frecuencia que es filtrada por el filtro.

Para ver la relación entre ellas, y determinar el umbral de amplitud en la serie filtrada, realizamos un diagrama de dispersión (scatter plot), donde dejamos de lado las rampas menores a 20 % en valor absoluto ya que no son de interés para este trabajo. En el diagrama de dispersión para cada parque se muestra al ajuste por mínimos cuadrados entre la amplitud de las rampas de la serie original y la filtrada (cuya pendiente define la relación media entre sus amplitudes según un ajuste por mínimos cuadrados) y un

valor común a todos los parques que se definió como umbral, el cual es diferente para las distintas longitudes de rampa y se presenta en las siguientes secciones.

Este análisis exploratorio se realizó, además de para cada parque eólico, para la unión de las potencias relativas de todos los parques.

### **3.3. Rampas por parques**

En esta sección se presentan los resultados del análisis exploratorio detallado anteriormente para cada intervalo de tiempo y para cada parque eólico.

Se presentan las 12 rampas de viento más grandes en valor absoluto, considerando la serie original; sobre éstas se grafica la serie filtrada, señalando si la misma superó el umbral definido como criterio de selección. También se muestra la gráfica de dispersión de las rampas de la serie original vs la serie filtrada, donde se indica la recta  $y=x$ , el ajuste lineal que mejor aproxima a los datos y el umbral que determina la región de rampas seleccionadas. Por último, se muestran los histogramas de frecuencia de ocurrencia de las rampas seleccionadas.

#### **3.3.1. Rampas 15'**

En las Figuras 3.1 y 3.2 se observan las rampas más grandes hacia abajo y hacia arriba, respectivamente, ocurridas en un par de parques. (Para el resto de los parques ver Anexo A). La línea azul corresponde a los datos originales, y la roja a la serie filtrada, en este caso con un filtro binomial de tres puntos. En aquellos casos donde se cumple el criterio de selección, dicha línea roja es más gruesa.

Estas figuras permiten observar que el filtro binomial seleccionado y el criterio definido descartan las rampas con un componente importante de alta frecuencia en la serie de potencia y rescatan aquellas que queremos estudiar.

RAMP-DOWN. Eólico 2

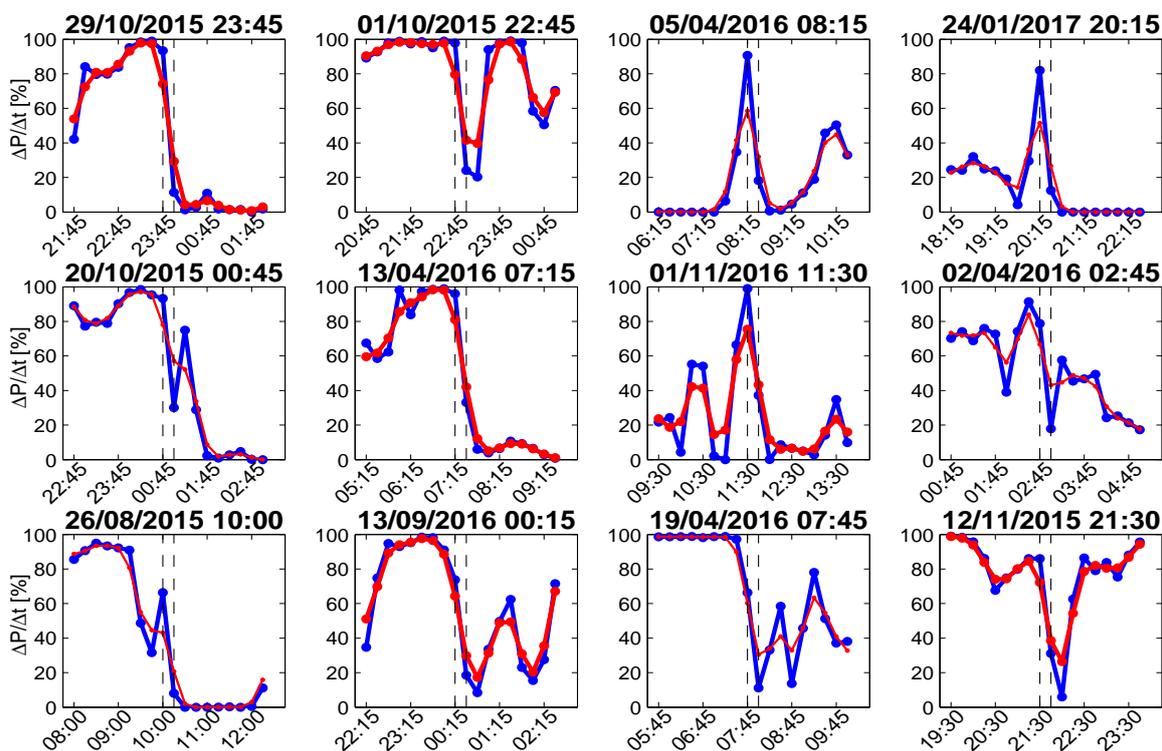


Figura 3.1: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 3

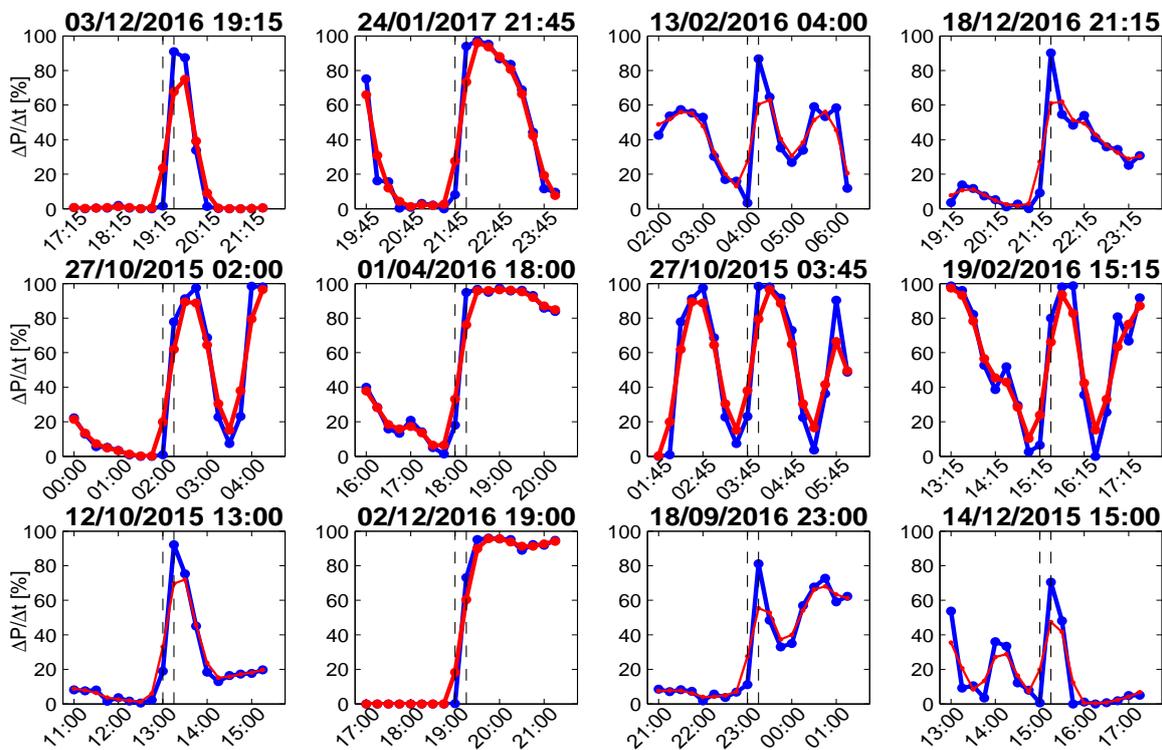


Figura 3.2: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de dispersión de rampas en la serie original y filtrada, el ajuste lineal y el umbral seleccionado que en este caso es  $y=0.5x$ , donde 'y' es la amplitud de las rampas en la serie filtrada y 'x' en la original.

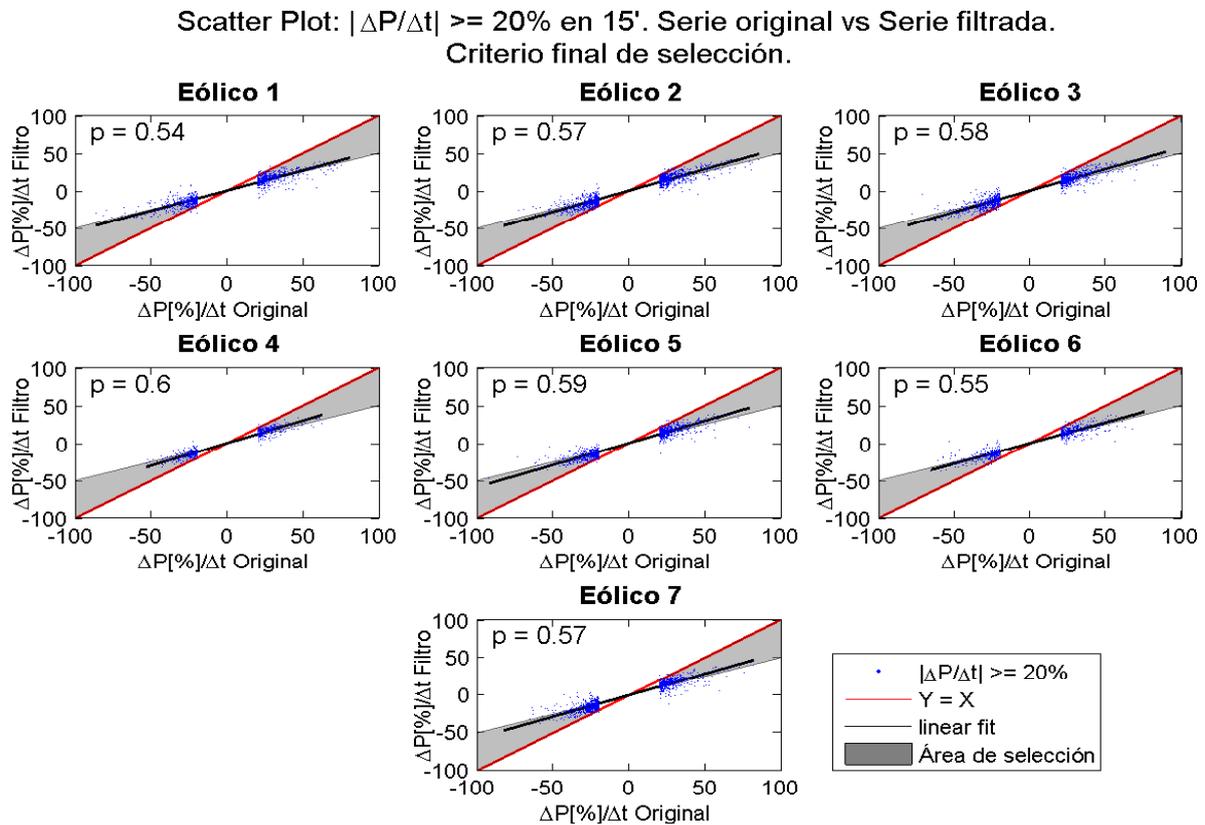


Figura 3.3: Scatter plot de rampas 15' por parque. Serie original vs serie filtrada. En rojo recta  $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada.

En la Figura 3.4 se presentan los histogramas de la frecuencia de ocurrencia de las rampas de 15' seleccionadas para cada parque eólico. Los histogramas tienden a tener un comportamiento simétrico, pero se puede apreciar que las rampas hacia arriba tienen mayor ocurrencia.

Frecuencia de ocurrencia de rampas de 15', según criterio:  $y = 0.5x$ .

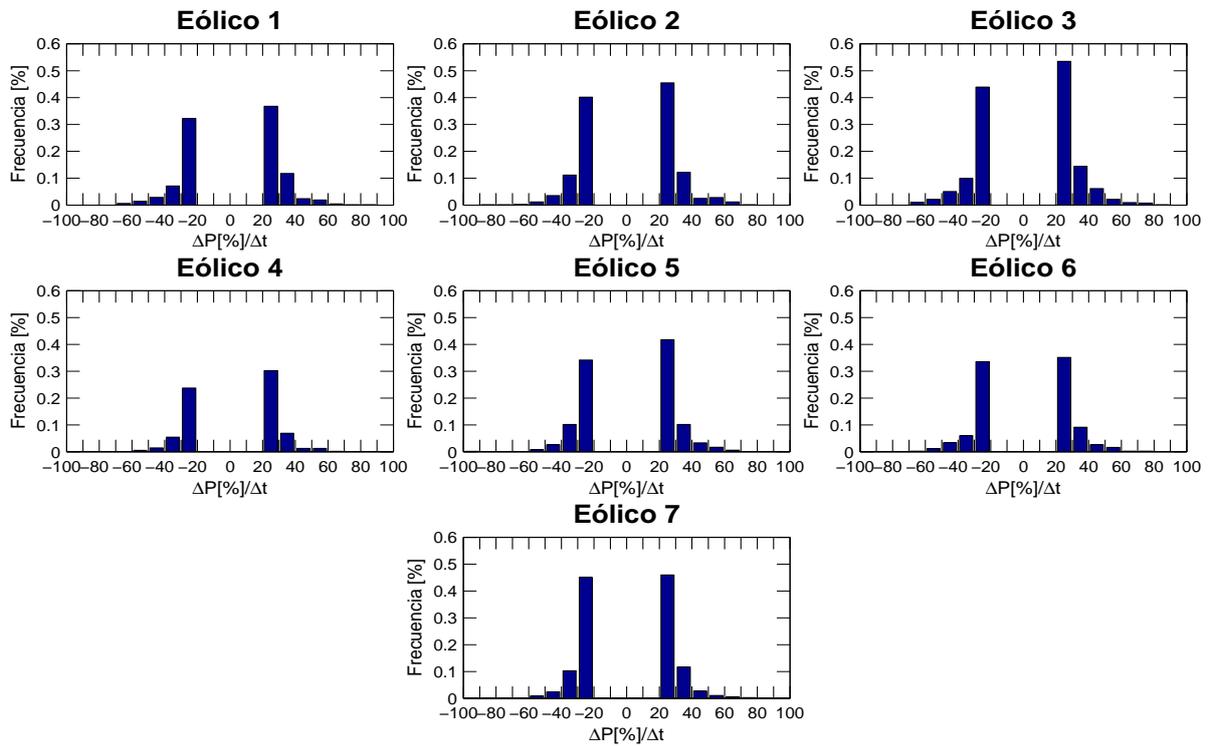


Figura 3.4: Histograma de ocurrencia de las rampas de 15' que fueron seleccionadas por parque eólico.

### 3.3.2. Rampas 30'

Análogamente se presentan en las Figuras 3.5 y 3.6 las rampas de 30' más grandes hacia abajo y hacia arriba, respectivamente, ocurridas en un par de parques. (Para el resto de los parques ver Anexo B). La línea azul corresponde a los datos originales, y la roja a la serie filtrada, en este caso con un filtro binomial de cuatro puntos. En aquellos casos donde se cumple el criterio de selección, dicha línea roja es más gruesa.

## RAMP-DOWN. Eólico 3

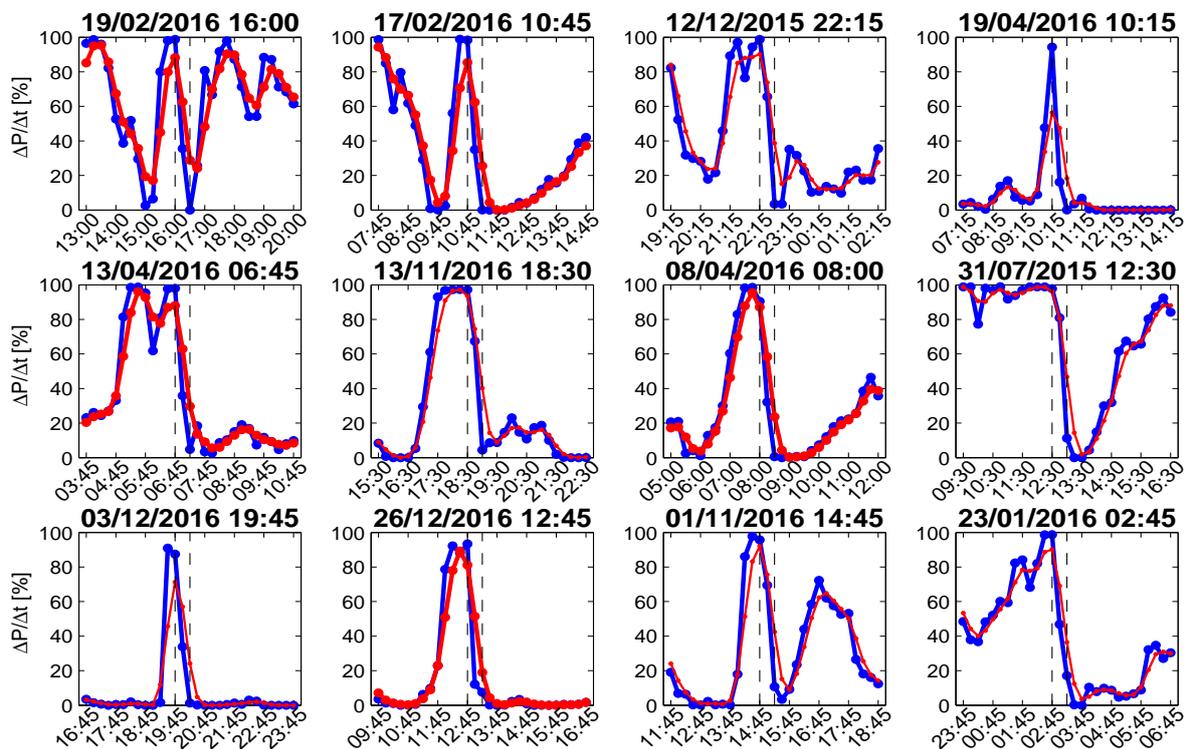


Figura 3.5: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cuatro puntos.

## RAMP-UP. Eólico 5

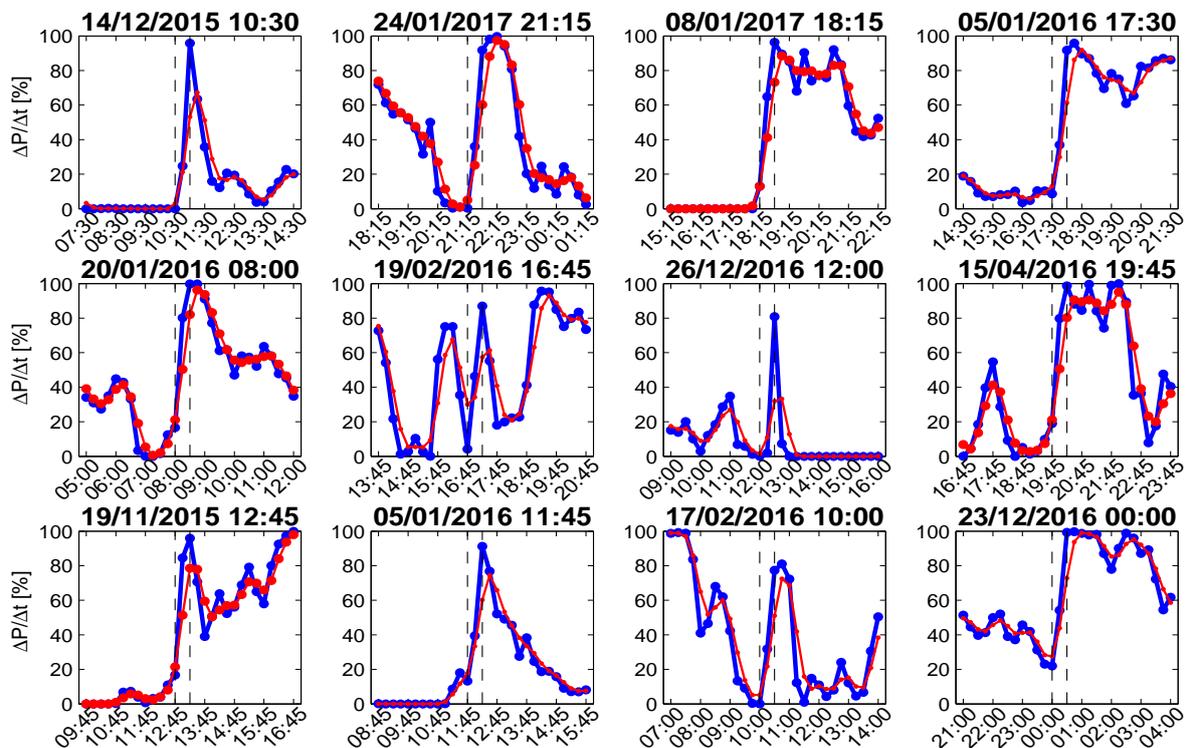


Figura 3.6: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cuatro puntos.

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de dispersión de rampas en la serie original y filtrada, el ajuste lineal y el umbral seleccionado que en este caso es  $y=0.65x$ , donde 'y' es la amplitud de las rampas en la serie filtrada y 'x' en la original.

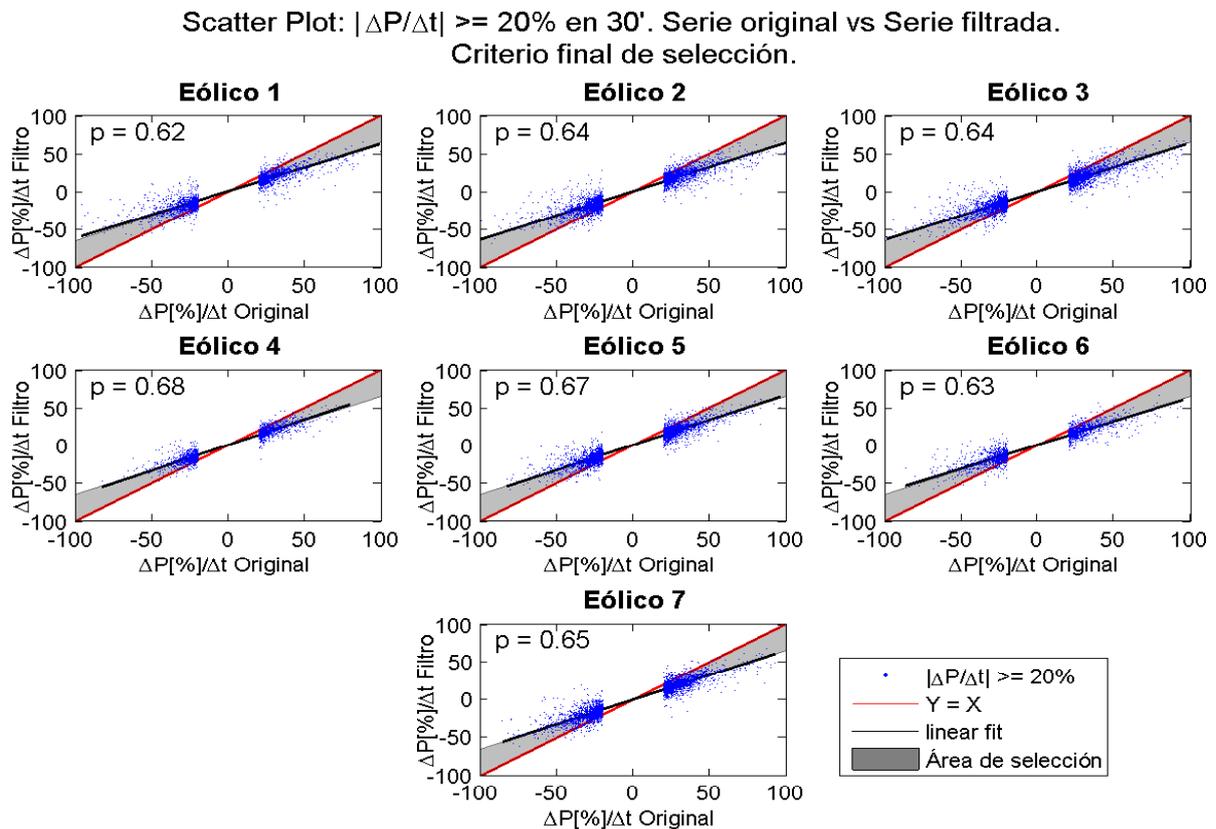


Figura 3.7: Scatter plot de rampas 30' por parque. Serie original vs serie filtrada. En rojo recta  $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada.

Adicionalmente para estas rampas de 30 minutos se deben identificar las rampas superpuestas del mismo signo, esto es, aquellas rampas que ocurren con una diferencia menor a los 30 minutos nos quedamos con la más grande en valor absoluto.

En la Figura 3.8 se presentan los histogramas de la frecuencia de ocurrencia de las rampas de 30' seleccionadas para cada parque eólico. Los histogramas tienden a tener un comportamiento simétrico, pero se puede apreciar que las rampas hacia arriba tienen mayor ocurrencia.

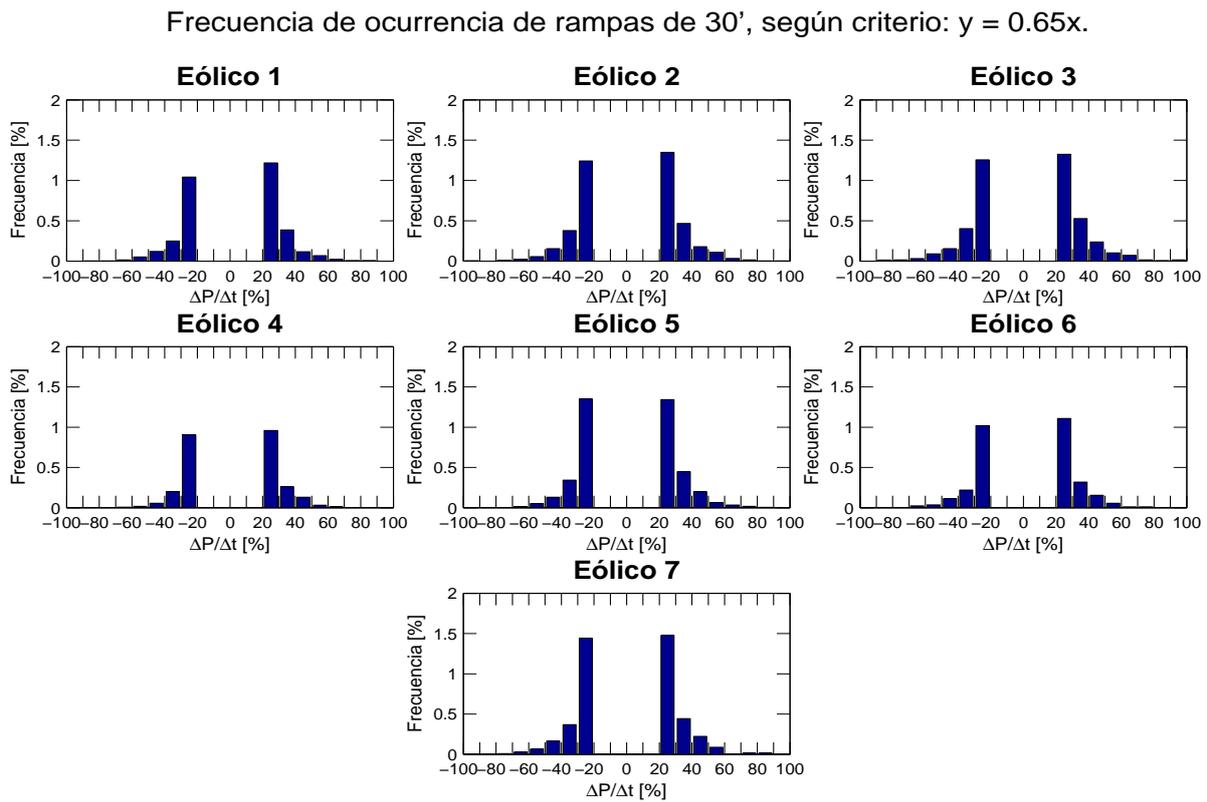


Figura 3.8: Histograma de ocurrencia de las rampas de 30' que fueron seleccionadas por parque eólico.

### 3.3.3. Rampas 60'

Finalmente para las rampas de 60' se presentan en las Figuras 3.9 y 3.10 las rampas más grandes hacia abajo y hacia arriba, respectivamente, ocurridas en un par de parques. (Para el resto de los parques ver Anexo C). La línea azul corresponde a los datos originales, y la roja a la serie filtrada, en este caso con un filtro binomial de cinco puntos. En aquellos casos donde se cumple el criterio de selección, dicha línea roja es más gruesa.

RAMP-DOWN. Eólico 7

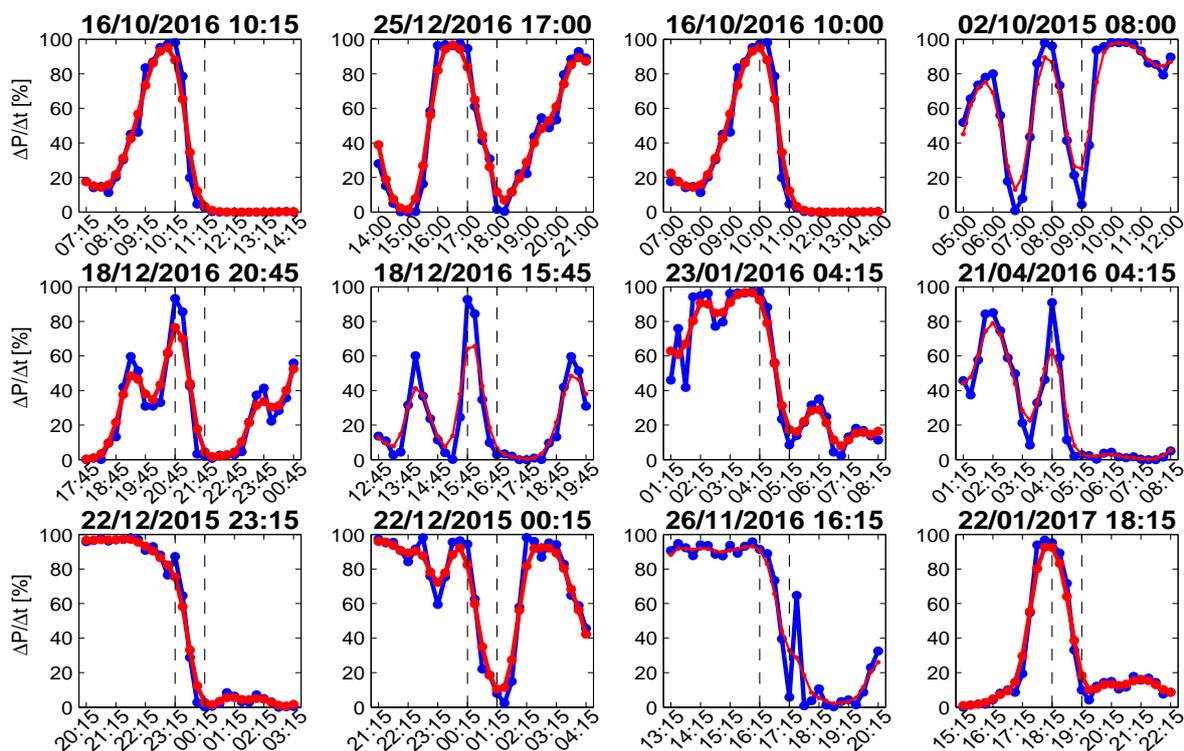


Figura 3.9: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cinco puntos.

RAMP-UP. Eólico 6

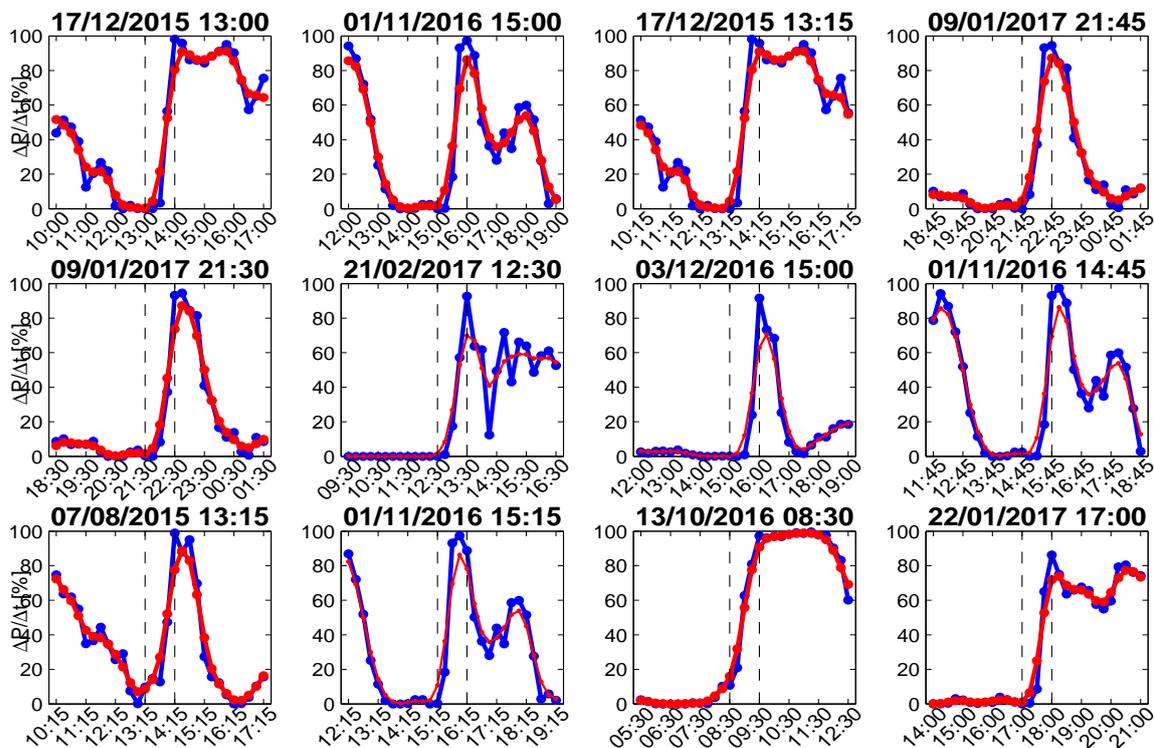


Figura 3.10: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de cinco puntos.

En la Figura 3.11 se muestra el diagrama de dispersión de rampas en la serie original y filtrada, el ajuste lineal y el umbral seleccionado que en este caso es  $y=0.8x$ , donde 'y' es la amplitud de las rampas en la serie filtrada y 'x' en la original.

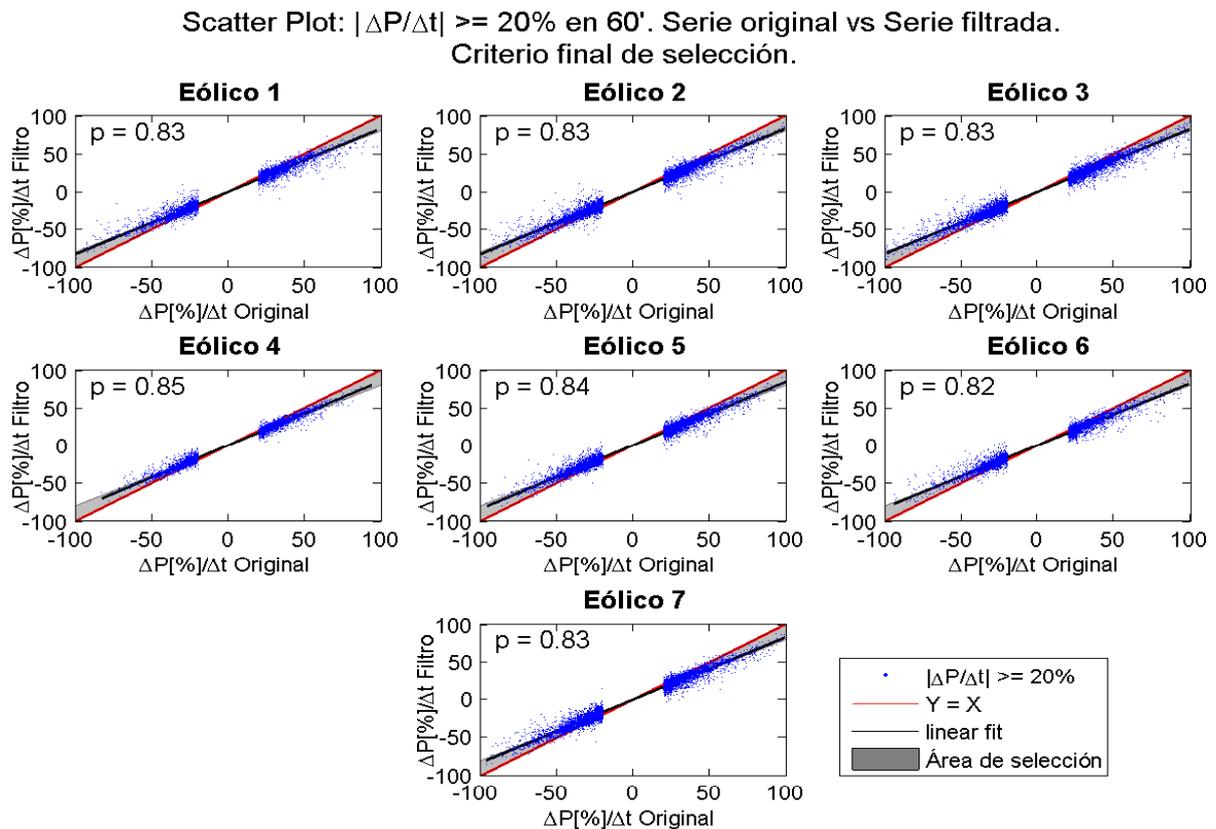


Figura 3.11: Scatter plot de rampas 60' por parque. Serie original vs serie filtrada. En rojo recta  $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada.

Para finalizar se deben identificar las rampas superpuestas del mismo signo, en este caso son aquellas rampas que ocurren con una diferencia menor a los 60 minutos y se elige la de mayor magnitud en valor absoluto.

En la Figura 3.12 se presentan los histogramas de la frecuencia de ocurrencia de las rampas de 60' seleccionadas para cada parque eólico. Los histogramas tienden a tener un comportamiento simétrico, pero se puede ver que a diferencia de los casos anteriores, las rampas hacia abajo que tengan magnitud entre 20% y 30% son más frecuentes.

Frecuencia de ocurrencia de rampas de 60', según criterio:  $y = 0.8x$ .

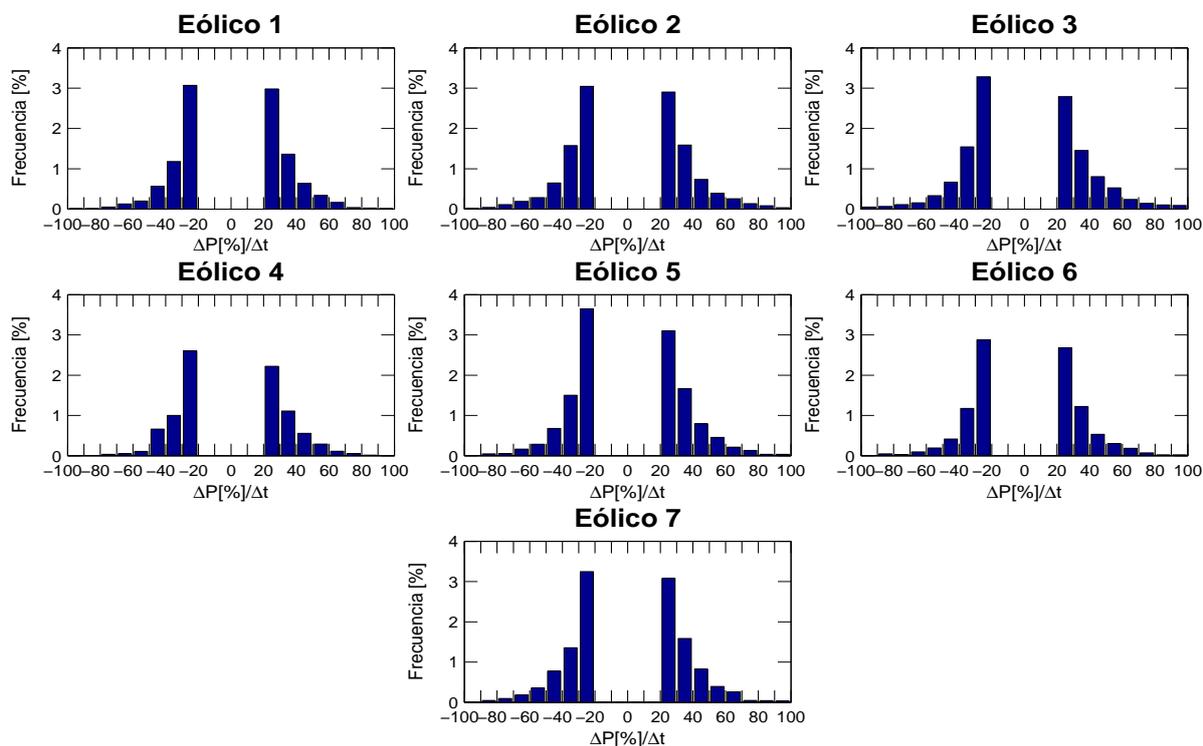


Figura 3.12: Histograma de ocurrencia de las rampas de 60' que fueron seleccionadas por parque eólico.

### 3.4. Rampas conjuntas

En esta sección presentamos los resultados de considerar los 7 parques eólicos juntos. Se unieron para cada intervalo de tiempo, todas las rampas que ocurrieron en cada parque eólico.

Se muestra el diagrama de dispersión de las rampas en la serie original vs la serie filtrada y el histograma de ocurrencia de rampas por intensidad.

#### 3.4.1. Rampas 15'

En la Figura 3.13 se muestra el diagrama de dispersión de rampas en la serie original y filtrada, considerando todas las rampas que ocurrieron en los siete parques. Los datos se alinean según la recta de pendiente 0.57, manteniendo el comportamiento que tenían los parques individuales. Por lo tanto, si aplicamos la definición de rampas quincenminutales obtenemos el área sombreada. La cantidad de rampas que se seleccionaron son 2166 negativas y 2538 positivas.

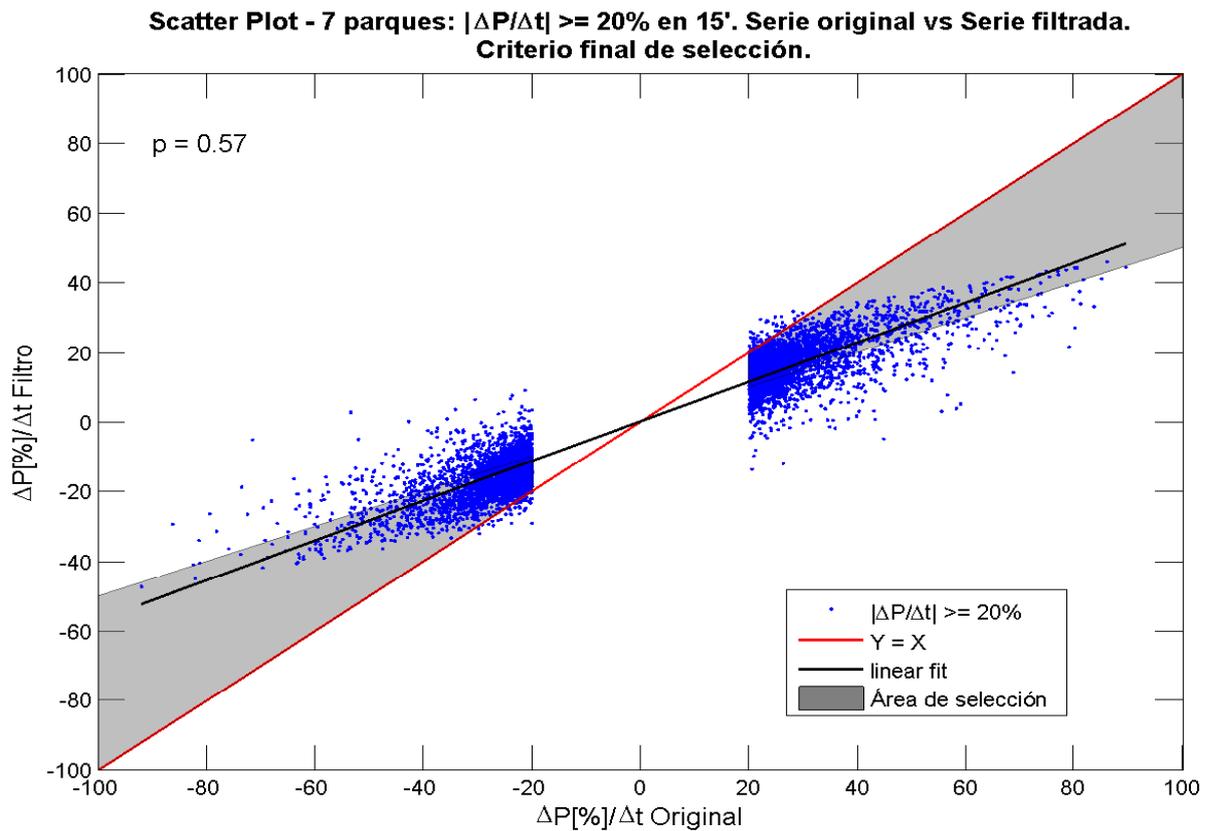


Figura 3.13: Scatter plot de rampas 15'. Serie original vs serie filtrada. Puntos azules corresponden a las rampas en los siete parques. En rojo recta  $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada.

En la Figura 3.14 se presenta la ocurrencia de las rampas de 15' que fueron seleccionadas, por intensidad. Si bien se destaca que el histograma tiende a ser simétrico, las rampas hacia arriba son un poco más.

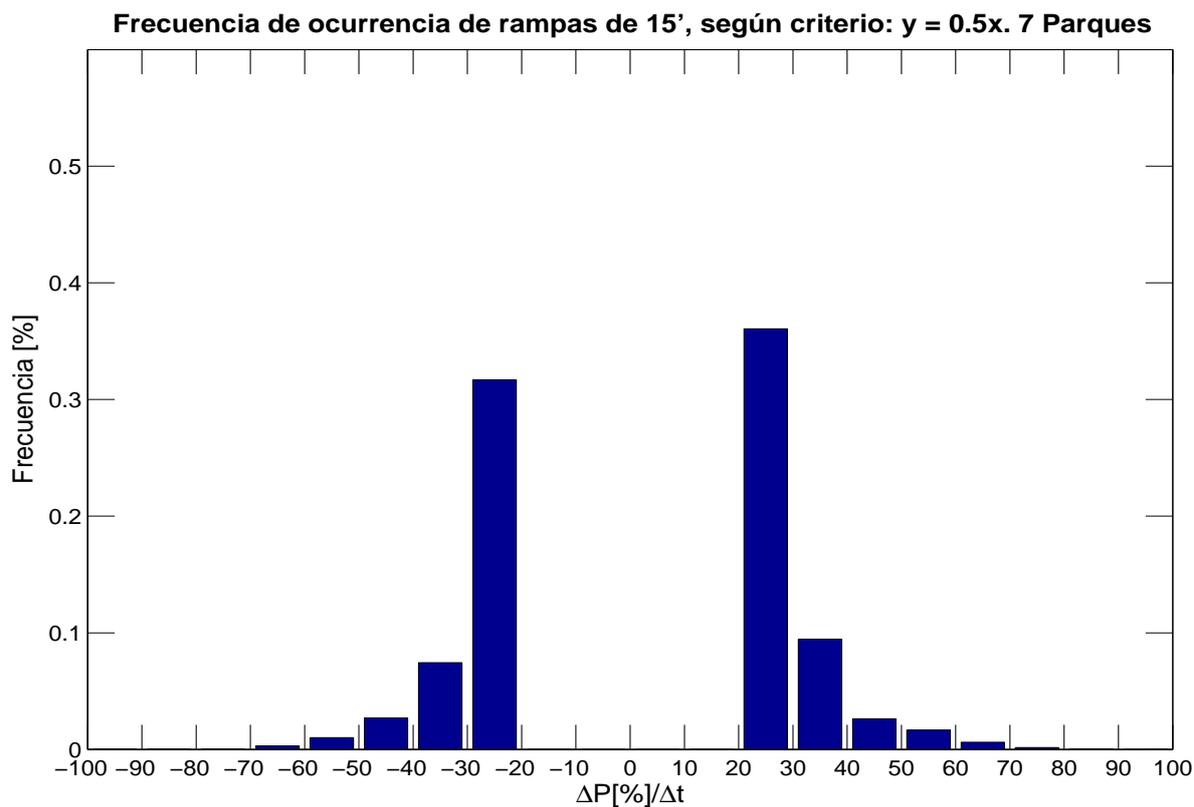


Figura 3.14: Histograma de ocurrencia de las rampas de 15' que fueron seleccionadas para los siete parques.

### 3.4.2. Rampas 30'

En la Figura 3.15 se muestra el diagrama de dispersión de rampas en la serie original y filtrada, considerando todas las rampas de los siete parques. Los datos se alinean según la recta con pendiente 0.64 como con los parques individuales. Por lo tanto el criterio de selección de las rampas de 30' es identificar las rampas que al filtrar la serie con un filtro binominal de cuatro puntos mantengan una relación mayor a 65% con la serie filtrada. La cantidad de rampas que se seleccionaron son 3735 negativas y 4304 positivas.

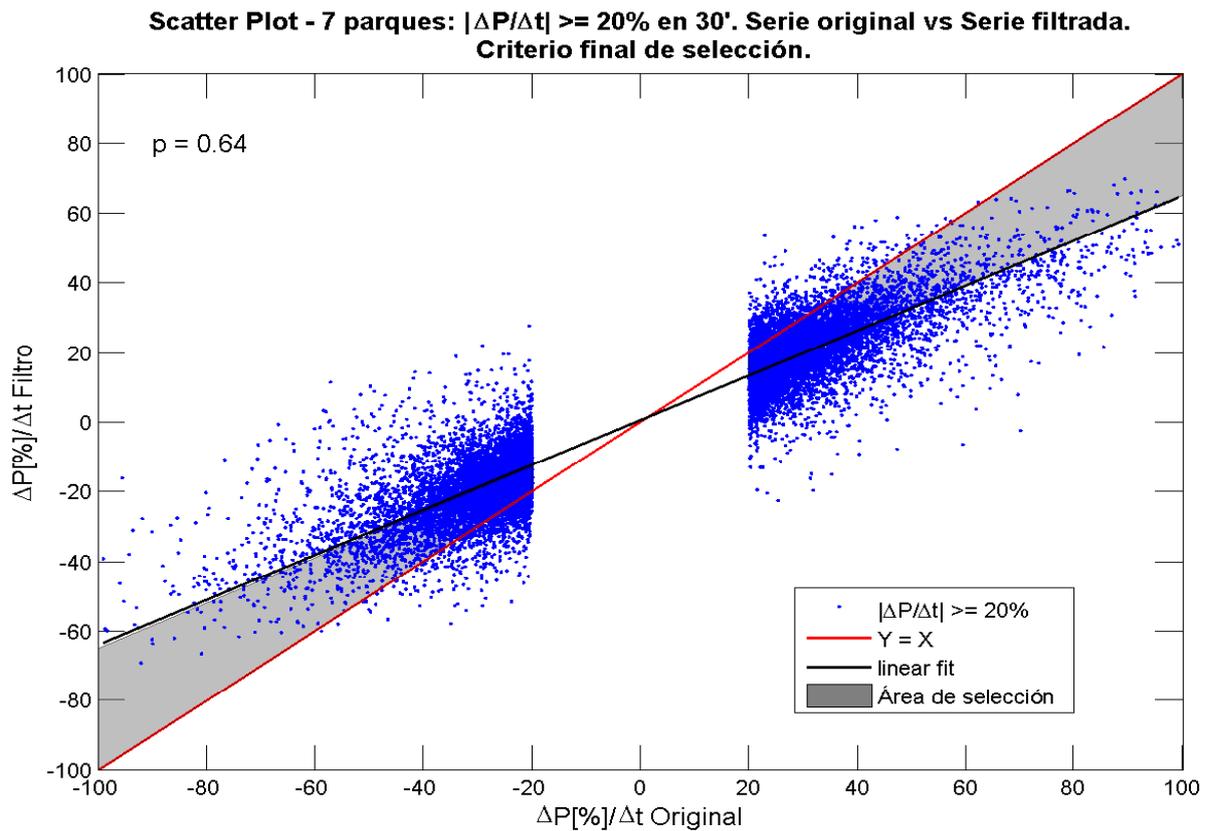


Figura 3.15: Scatter plot de rampas 30°. Serie original vs serie filtrada. Puntos azules corresponden a las rampas en los siete parques. En rojo recta  $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada.

En la Figura 3.16 se presenta el histograma con la ocurrencia de las rampas de 30° que fueron seleccionadas, por intensidad. Si bien se destaca que el histograma tiende a ser simétrico, las rampas hacia arriba son un poco más.

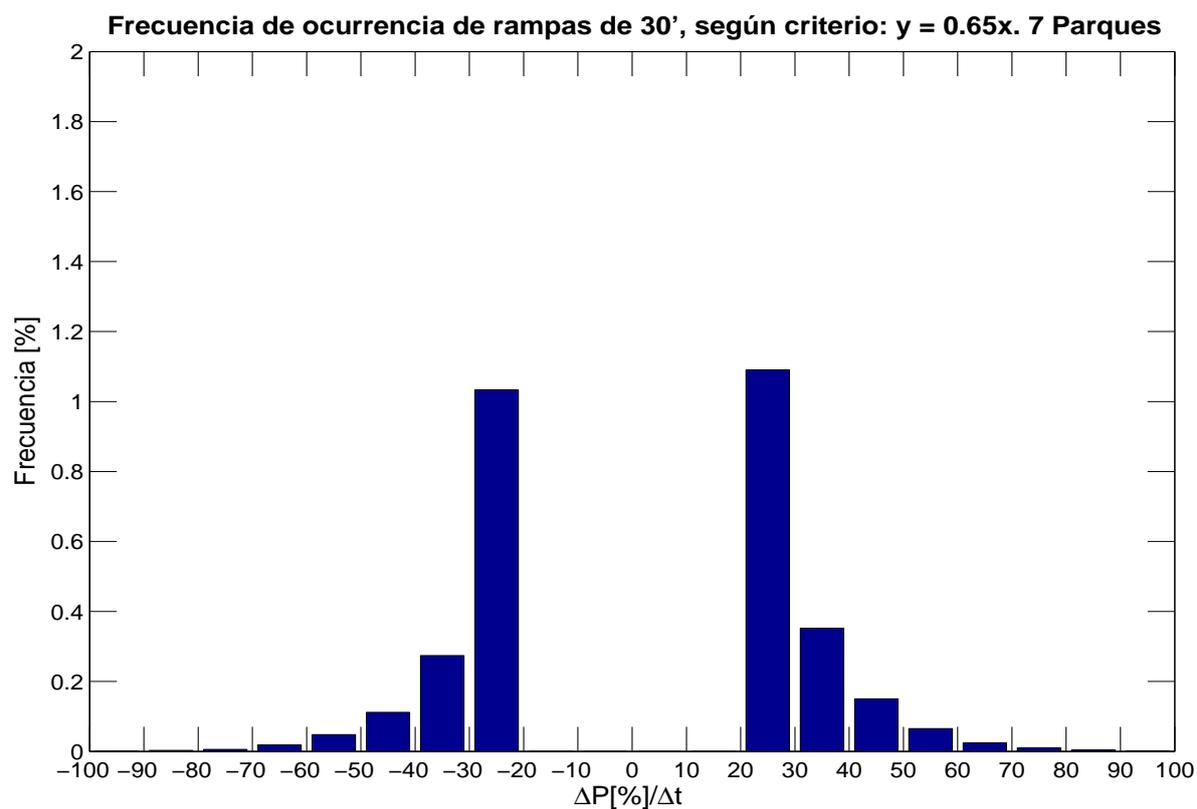


Figura 3.16: Histograma de ocurrencia de las rampas de 30' que fueron seleccionadas para los siete parques.

### 3.4.3. Rampas 60'

En la Figura 3.17 se muestra el diagrama de dispersión de rampas en la serie original y filtrada, considerando todas las rampas de los siete parques. En este caso los datos se alinean a la recta con pendiente 0.83 como ocurría con los parques individuales. El criterio de selección de las rampas de 60' es identificar las rampas que al filtrar la serie con un filtro binominal de cinco puntos mantengan una relación mayor a 80% con la serie filtrada. La cantidad de rampas que se seleccionaron son 6118 negativas y 7254 positivas.

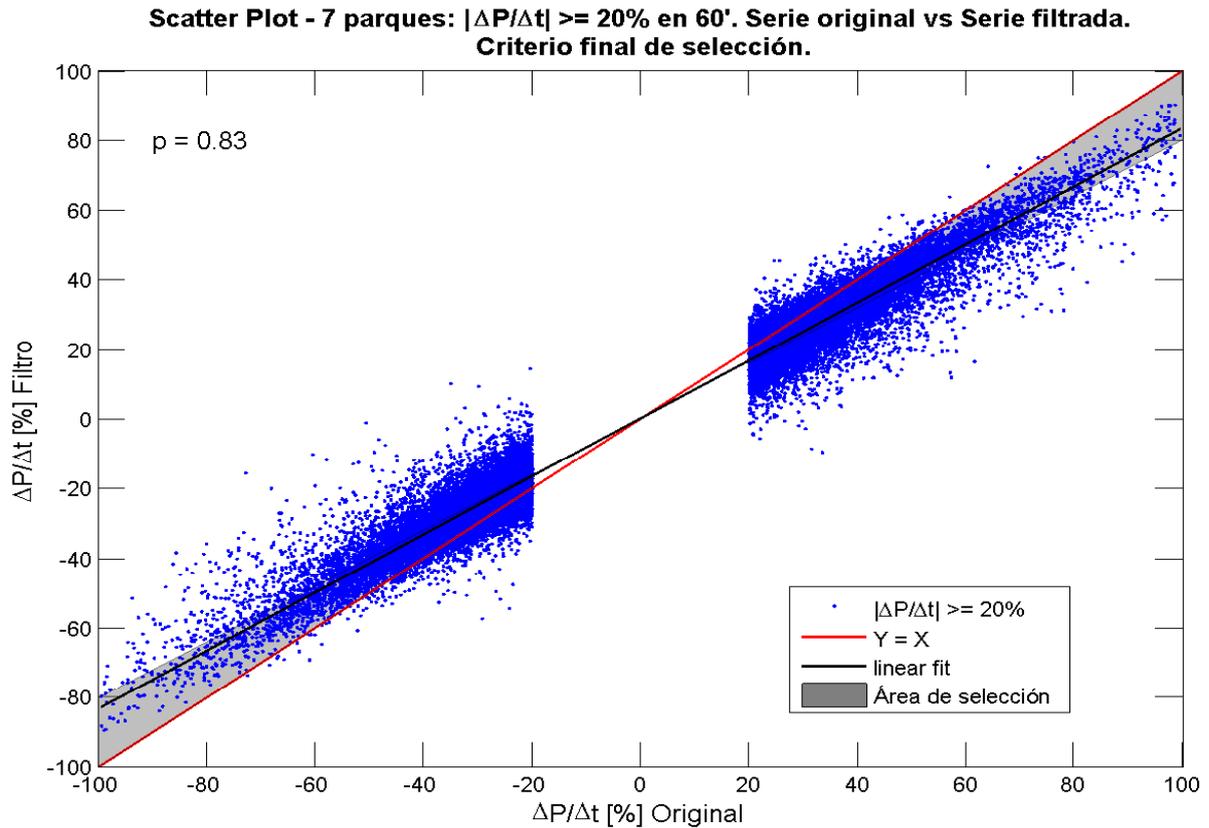


Figura 3.17: Scatter plot de rampas 60'. Serie original vs serie filtrada. Puntos azules corresponden a las rampas en los siete parques. En rojo recta  $Y = X$ . En negro "linear fit". Criterio final de selección en área sombreada.

En la Figura 3.18 se presenta el histograma con la ocurrencia de las rampas de 60' que fueron seleccionadas, por intensidad. Solamente para este caso se puede observar que las rampas negativas de 20% a 30% son más que las positivas en ese rango, luego siempre hay más positivas.

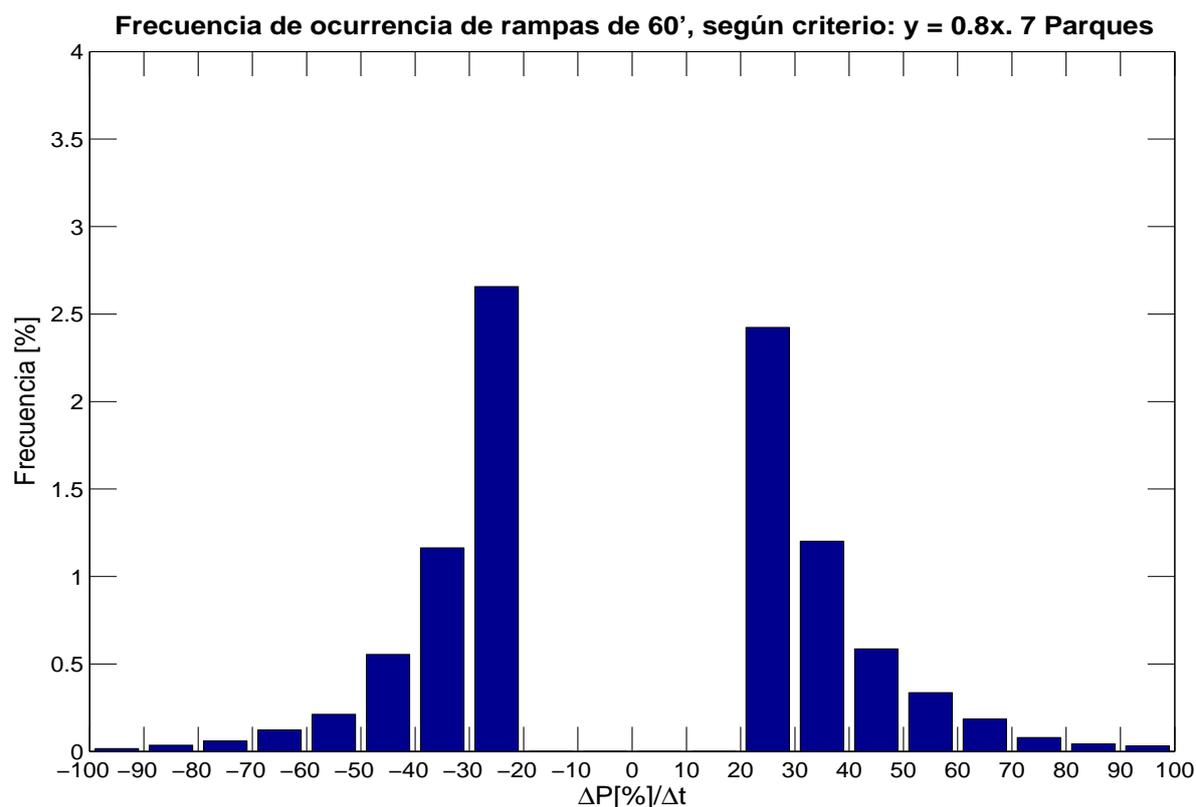


Figura 3.18: Histograma de ocurrencia de las rampas de 60' que fueron seleccionadas para los siete parques.

### 3.5. Consideraciones Finales

De esta manera queda definida la serie de rampas de viento para cada intervalo de tiempo, la cual se utilizará para realizar la descripción climatológica y meteorológica en los siguientes capítulos.

La Tabla 3.1 resume la cantidad de rampas que fueron seleccionadas.<sup>1</sup>

# Rampas	15'	30'	60'
Positivas	2538	4304	7254
Negativas	2166	3735	6118
Total	4704	8039	13372

Tabla 3.1: Cantidad de rampas de viento que fueron seleccionadas por intervalo de tiempo. Serie original quinceminutal de dos años.

<sup>1</sup>350 rampas son 1% de los datos quinceminutales por año

Si bien el procedimiento de selección de rampas es cualitativamente análogo para las rampas de 15, 30 y 60', los umbrales usados en cada caso -los filtros y el umbral de relación entre rampas de la serie original y filtrada- surgen de definiciones subjetivas hechas en base a inspección de las series de potencia y los diagramas de dispersión de rampas, respectivamente. Es así que no se harán análisis cuantitativos que comparen la frecuencia de rampas de diferentes longitudes pues la metodología no lo permite.

## Capítulo 4

# Climatología

En el capítulo anterior se definieron los criterios para identificar las rampas en los diferentes intervalos de tiempo de interés.

En este capítulo se estudia para todos los intervalos de tiempo, la incidencia de la hora del día en las rampas, en cada parque eólico y considerando diferentes intensidades de rampas.

### 4.1. Ciclo Diurno

#### 4.1.1. Rampas 15'

En la Figura 4.1 se presenta el ciclo diurno de las rampas, positivas (rojo) y negativas (azul), para cada parque eólico. Se puede ver que para todos los parques las rampas hacia arriba (abajo) son más frecuentes en la tarde (mañana).

En la Figura 4.2 se puede observar para diferentes intervalos de intensidades de rampas, la ocurrencia en las horas del día, en particular para el parque eólico 3. (Para el resto de los parques ver Anexo A). Los intervalos fueron elegidos simétricamente para observar el comportamiento de las rampas iguales y opuestas. Se observa que a medida que se incrementa la intensidad de las rampas, en valor absoluto, la muestra de las mismas es más chica.

Variación diaria de rampas 15' móvil.

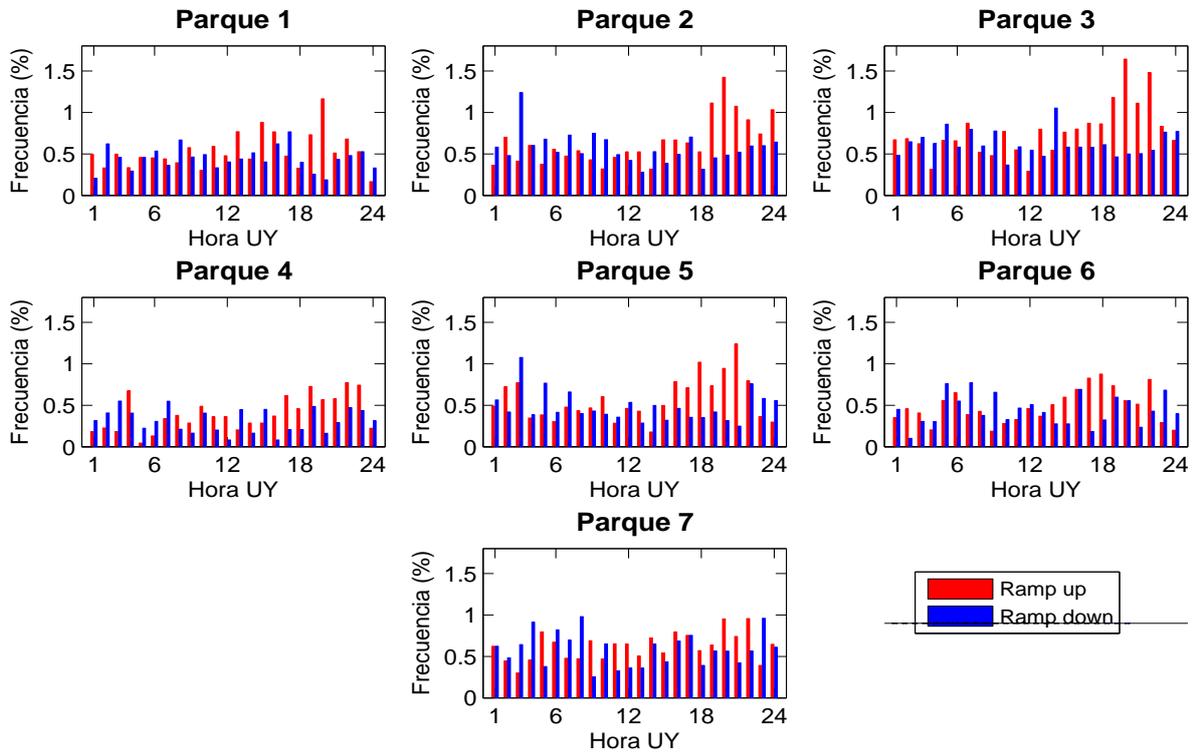


Figura 4.1: Ciclo diario de rampas de 15' en cada parque eólico.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 3

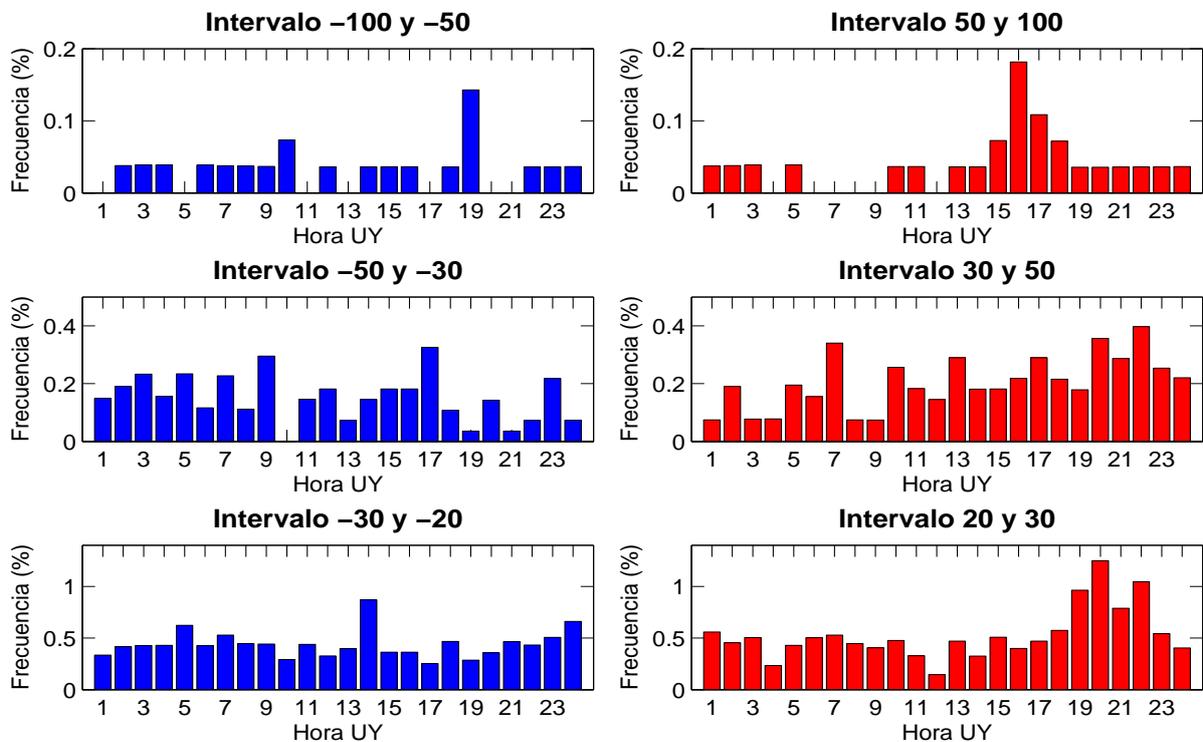


Figura 4.2: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

### 4.1.2. Rampas 30'

En la Figura 4.3 se presenta el ciclo diario de las rampas, positivas y negativas, para cada parque eólico. En este caso también se observan que las rampas hacia arriba (abajo) son más frecuentes en la tarde (mañana).

En la Figura 4.4 se puede observar para el parque eólico 1 el ciclo diario de las rampas para diferentes intervalos de intensidades. (Para el resto de los parques ver Anexo B). Nuevamente se observa que al aumentar la intensidad de las rampas, en valor absoluto, la muestra de las mismas se achica.

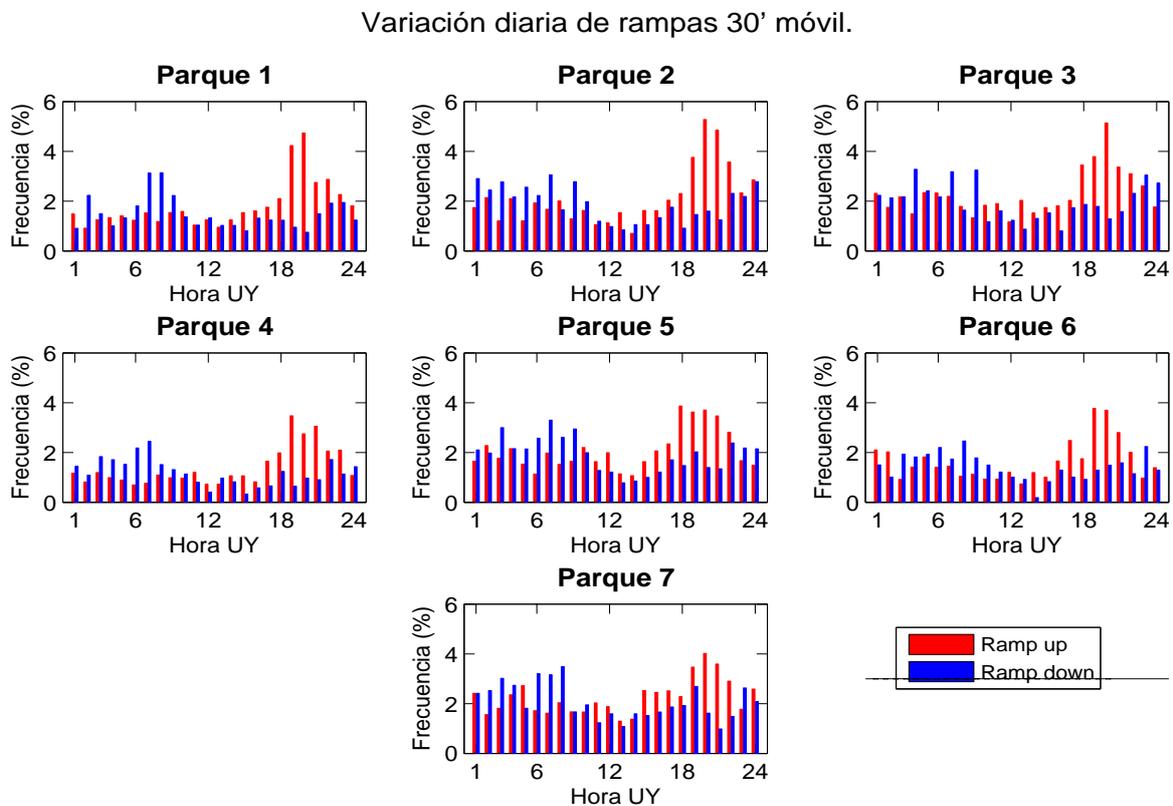


Figura 4.3: Ciclo diario de rampas de 30' en cada parque eólico.

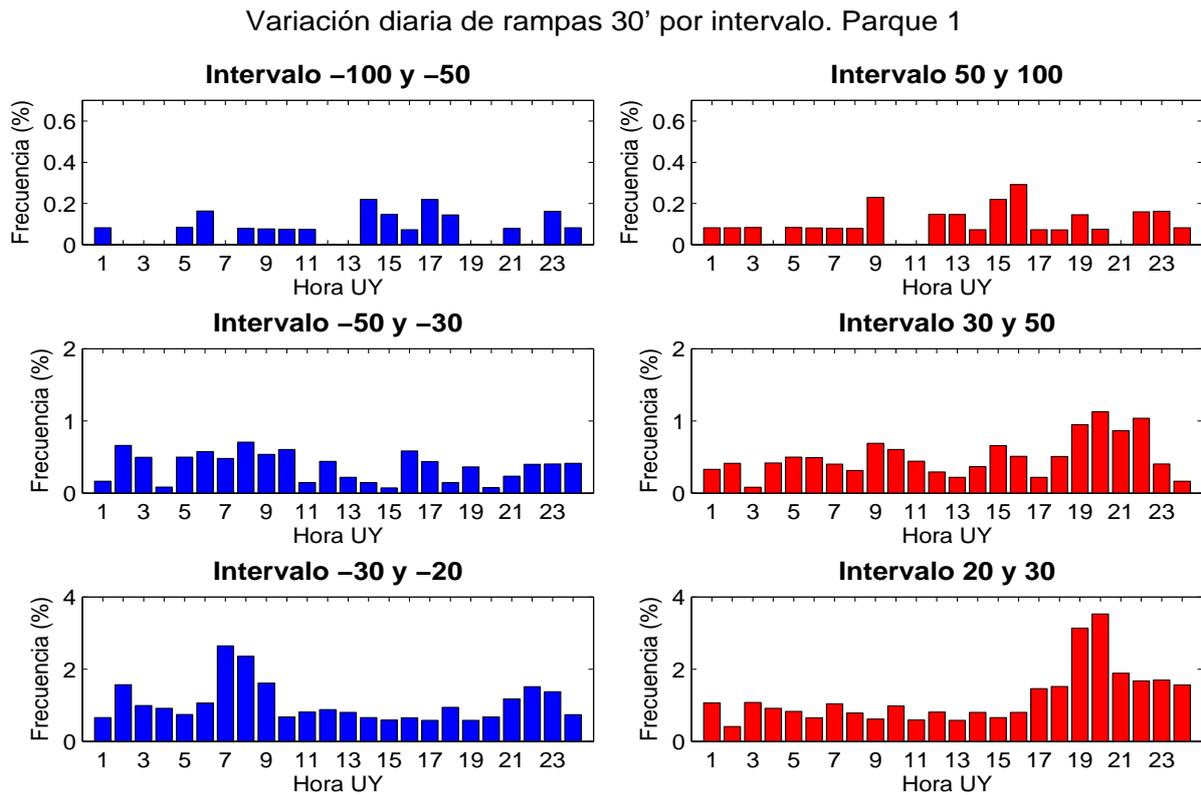


Figura 4.4: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

### 4.1.3. Rampas 60'

En la Figura 4.5 se presenta el ciclo diario de las rampas, positivas y negativas, para cada parque eólico. Las rampas hacia arriba (abajo) son más frecuentes en la tarde (mañana) y tienen más frecuencia de ocurrencia que las otras rampas.

En la Figura 4.6 se puede observar para el parque eólico 7 la ocurrencia de las rampas para diferentes intervalos de intensidades. (Para el resto de los parques ver Anexo C). También en este caso se observa que a medida que aumenta la intensidad de las rampas, en valor absoluto, la muestra es más pequeña.

En este caso no se destaca ningún valor máximo en particular, pero si se mantiene que las rampas hacia abajo tienen máximos en la mañana, y las rampas hacia arriba máximos en la tarde.

Variación diaria de rampas 60' móvil.

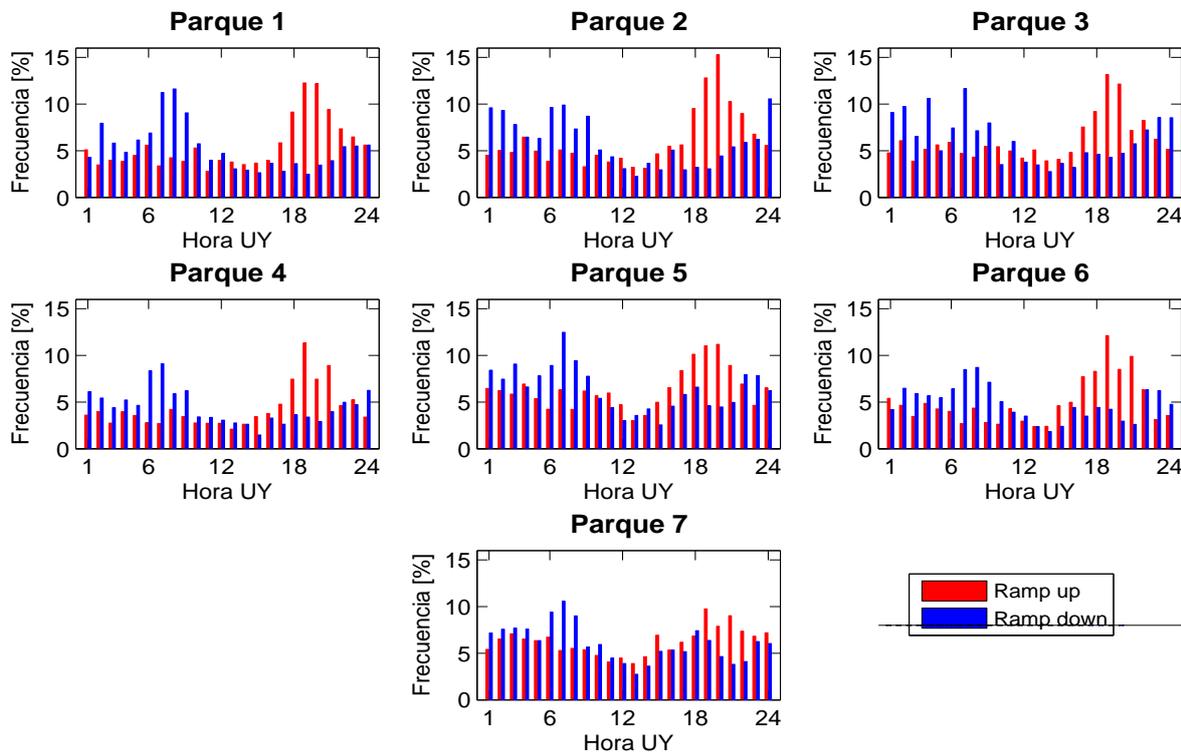


Figura 4.5: Ciclo diario de rampas de 60' en cada parque eólico.

Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 7

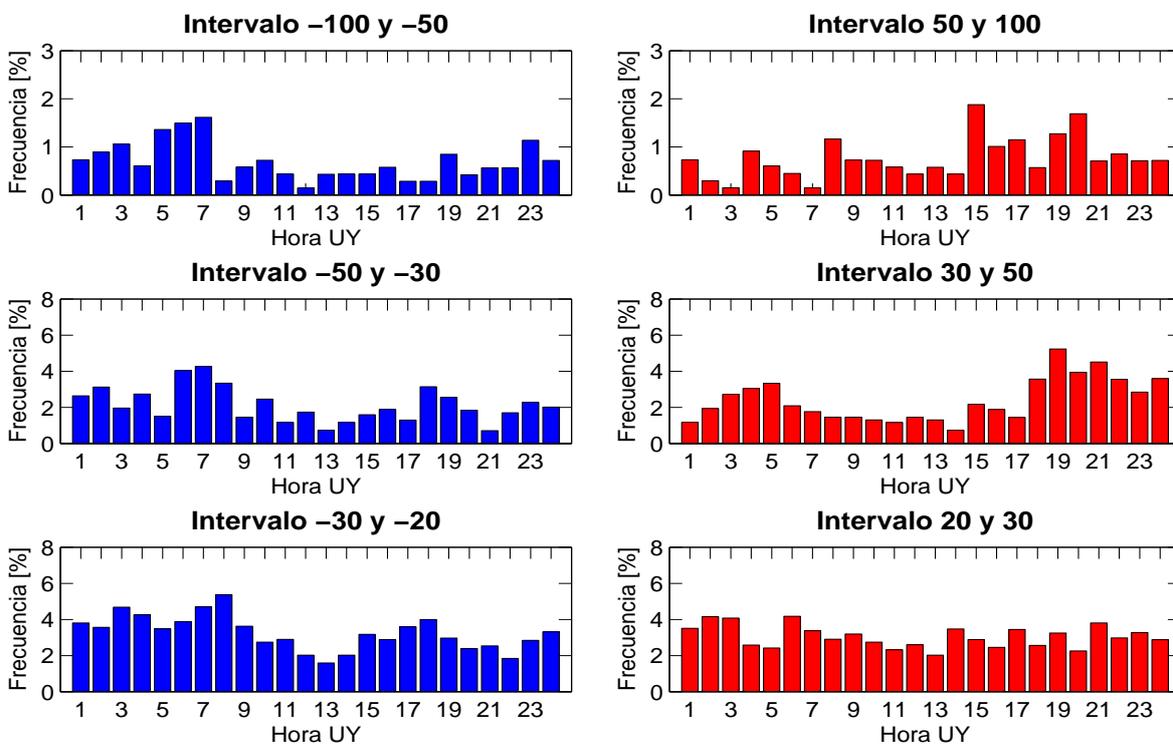


Figura 4.6: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

## 4.2. Rampas Conjuntas

En esta sección se presenta el ciclo diario para la serie que se forma de unir todas las rampas seleccionadas de todos los parques eólicos para los diferentes intervalos de tiempo, 15, 30 y 60 minutos. También se muestra el ciclo diario para algunos intervalos de intensidades de rampas.

### 4.2.1. Rampas 15'

En la Figura 4.7 se presenta el ciclo diario de las rampas de 15 minutos. Las rampas hacia arriba (abajo) son más frecuentes en la tarde (mañana).

Se observa que el ciclo diario de las rampas negativas está más extendido en algunas horas, mientras que el de las rampas positivas es más pronunciado. El máximo de rampas negativas ocurre a las tres de la mañana y el de rampas positivas a las 20 horas.

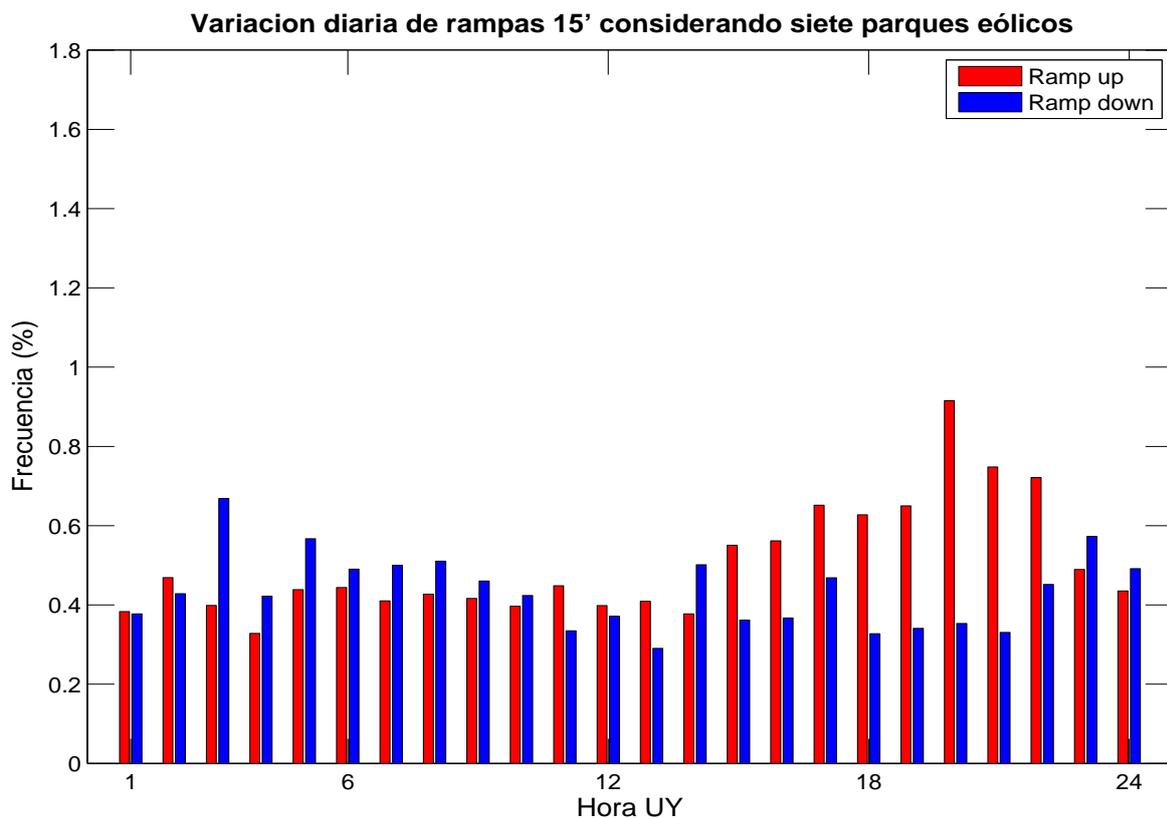


Figura 4.7: Ciclo diario de rampas de 15' para el total de los parques eólicos.

En la Figura 4.8 se puede ver el ciclo diario de las rampas de 15 minutos para diferentes intervalos de intensidad. El ciclo diario es muy suave para todos los intervalos de intensidades, pero se mantiene la característica de que las rampas positivas (negativas)

ocurren más en la tarde (madrugada), aunque no se observan los valores máximos bien definidos.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo, considerando siete parques eólicos

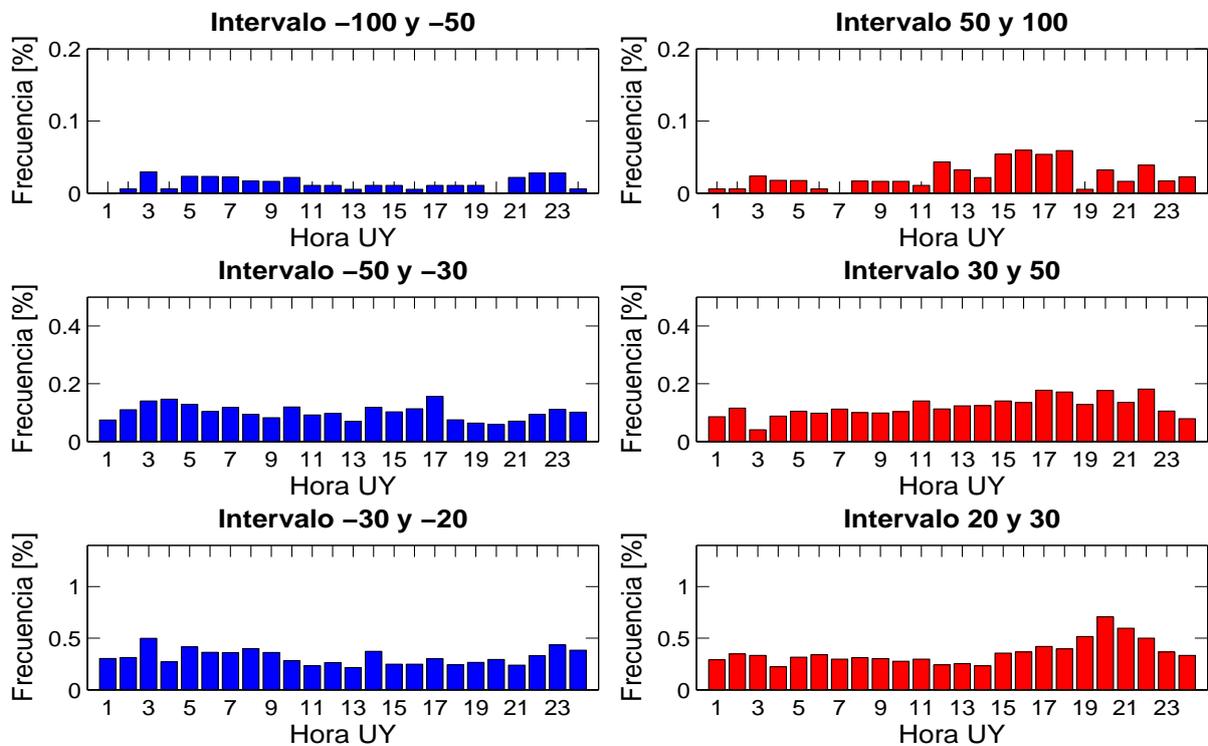


Figura 4.8: Ciclo diario de rampas 15' para el total de los parques por intervalo de intensidad de rampa.

### 4.2.2. Rampas 30'

En la Figura 4.9 se presenta el ciclo diario de las rampas de 30 minutos. Las rampas hacia arriba (abajo) son más frecuentes en la tarde (mañana).

El máximo de rampas negativas ocurre a las seis de la mañana y el de rampas positivas a las 20 horas.

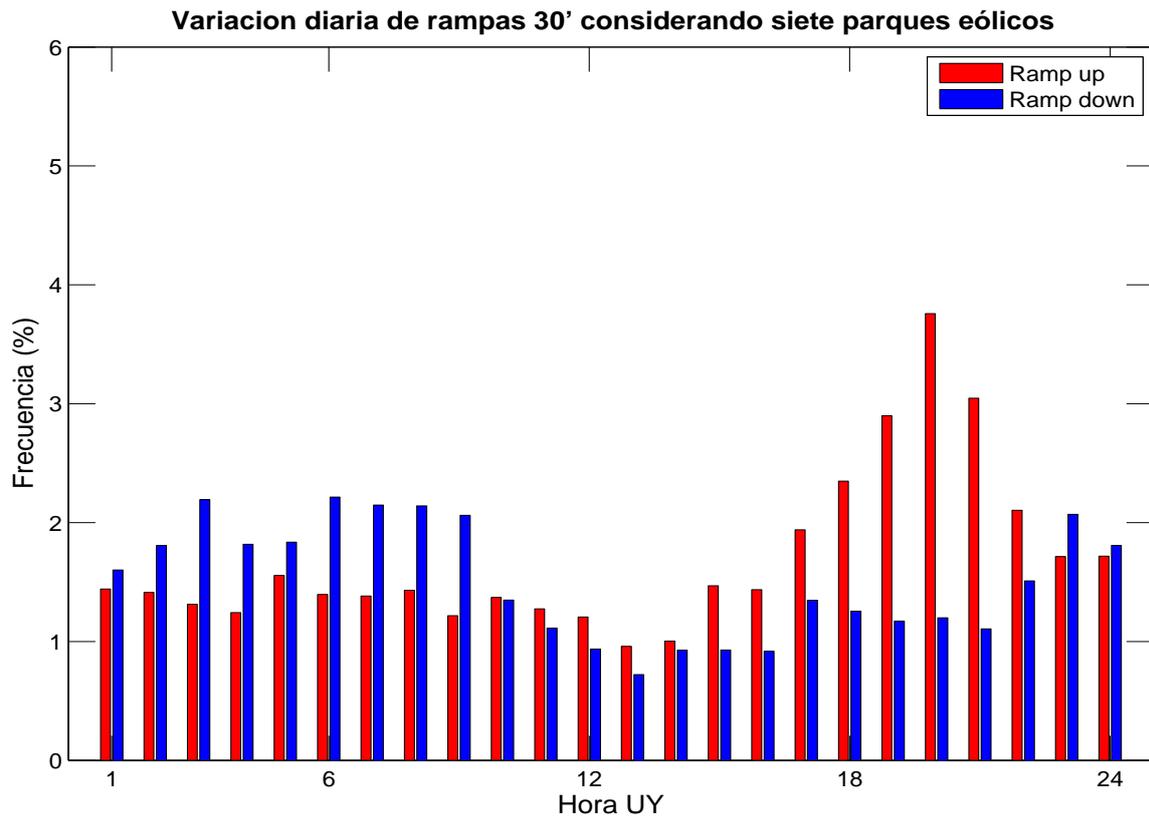


Figura 4.9: Ciclo diario de rampas de 30' para el total de los parques eólicos.

El ciclo diario de las rampas de 30 minutos para diferentes intervalos de intensidad se muestra en la Figura 4.10. Se mantiene que las rampas positivas (negativas) ocurren más en la tarde (mañana), sin tener bien definidos los picos máximos, salvo para las rampas positivas con intensidad entre 20 % y 50 % que se observa claramente un máximo a las 20 horas.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo, considerando siete parques eólicos

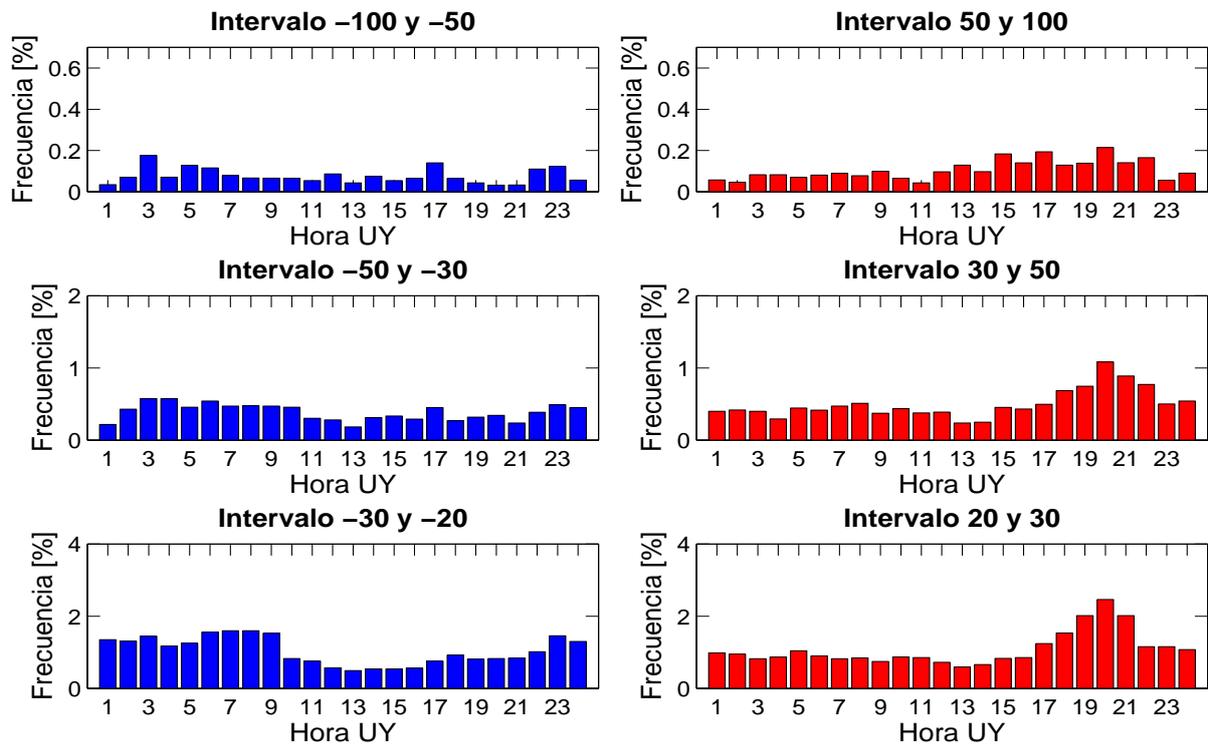


Figura 4.10: Ciclo diario de rampas 30' para el total de los parques por intervalo de intensidad de rampa.

### 4.2.3. Rampas 60'

En la Figura 4.11 se presenta el ciclo diario de las rampas de 60 minutos. Las rampas hacia arriba (abajo) son más frecuentes en la tarde (mañana).

El máximo de rampas negativas ocurre a las siete de la mañana y el de rampas positivas a las 20 horas.

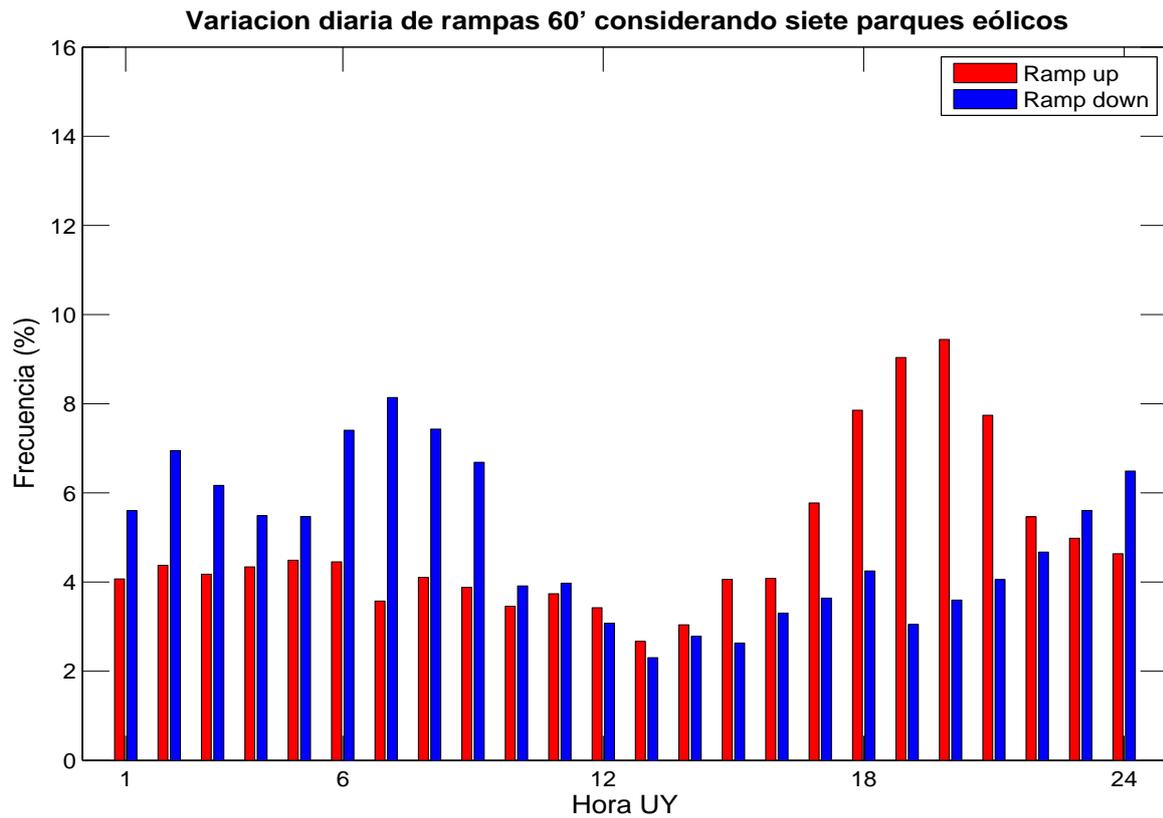


Figura 4.11: Ciclo diario de rampas de 60' para el total de los parques eólicos.

El ciclo diario de las rampas horarias para diferentes intervalos de intensidad se muestra en la Figura 4.12. Se mantiene que las rampas positivas (negativas) ocurren más en la tarde (mañana). A diferencia de los casos anteriores, las rampas negativas con intensidad entre 20% y 50%, muestran un ciclo diario levemente más marcado con un máximo a las siete horas. En las rampas positivas el ciclo diario se puede apreciar más definido, y el máximo valor ocurre a las 20 horas, para todas las intensidades

Variación diaria de rampas 60' por intervalo, considerando siete parques eólicos

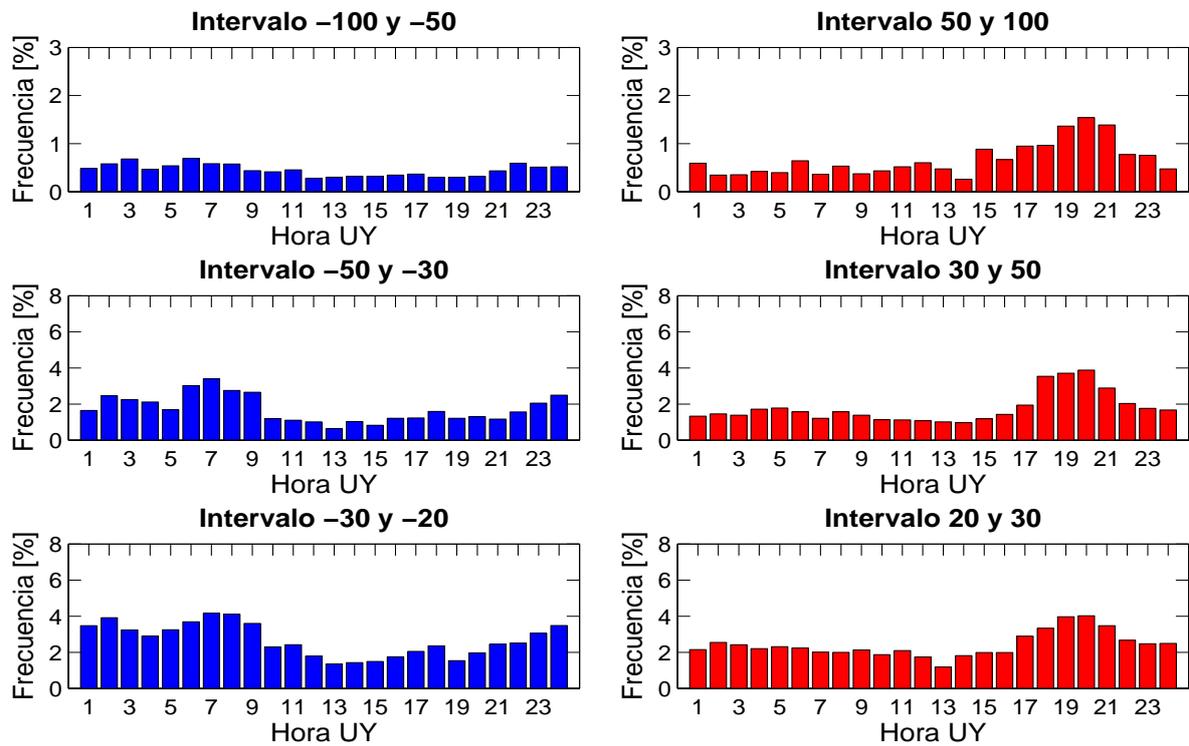


Figura 4.12: Ciclo diario de rampas 60' para el total de los parques por intervalo de intensidad de rampa.

### Consideraciones Finales

En la Tabla 4.1 se resumen algunos valores de interés que se calcularon para los diferentes intervalos de tiempo, considerando el ciclo diario de las rampas conjuntas. Se trabajó con el primer armónico de la transformada de Fourier para determinar la amplitud relativa a la media y la hora que ocurre, para las rampas negativas y positivas.

Estos resultados muestran que el pico máximo de las rampas negativa se sitúa un poco después de las cinco de la mañana, y como se venía observando, las rampas positivas lo ubican a las 20 horas. La amplitud que se observa es del orden de 40% de la media diaria en la mayoría de los casos para intervalos de 30' y 60'.

Intervalo	Rampas Negativas		Rampas Positivas	
	Ampl.Rel.a Media	Hora de Max	Ampl.Rel.a Media	Hora de Max
15'	0.19	5.2	0.30	19.9
30'	0.41	5.1	0.39	20.9
60'	0.45	5.1	0.38	20.2

Tabla 4.1: Valores normalizados de amplitud y fase del primer armónico, para rampas negativas y positivas por intervalo de tiempo.

### 4.3. Rampas simultáneas

Previo a describir la situación sinóptica asociada a los eventos de rampas, queremos estudiar si entre los parques seleccionados existe alguna relación en la ocurrencia de las rampas, es decir si la ocurrencia de una rampa en un parque condiciona la ocurrencia en otro parque. De ser así, entre qué parques y con qué temporalidad: en simultáneo o con algún desfase preferido.

Para este estudio en particular se considera solamente la serie de rampas de 60'. El procedimiento consiste en identificar en cada parque las rampas mayores a 50 % en valor absoluto (se repite el estudio para cada signo), y luego se busca si en el resto de los parques hay rampas mayores a 40 % en valor absoluto, y del mismo signo, en el entorno de las tres horas, anterior y posterior. Si existen rampas con estas características, registramos los minutos en que ocurrieron en relación a la rampa de 50 % del parque en estudio. Las rampas que ocurren antes las identificamos con un  $\delta t < 0$  y las rampas posteriores con  $\delta t > 0$ .

Los valores de 50 % para la rampa del parque en estudio y de 40 % para los otros, se definieron como los más altos posibles (los casos de mayor interés) en que se tiene un muestreo suficientemente amplio.

El entorno temporal se consideró bajo las condiciones de que se esté bajo una misma situación sinóptica. Los resultados que se hallaron confirman que el intervalo de tiempo es suficientemente grande, pues los desfases que se encontraron cuando la relación de rampas entre parque fue significativa, resultaron menores.

En la Tabla 4.2 (4.3) y la Figura 4.13 (4.14) se presentan los resultados absolutos y

normalizados de rampas positivas (negativas).

La información que se tiene se puede interpretar de la siguiente manera. Por ejemplo, para el parque eólico 4, del total de veces que ocurrieron rampas positivas mayores a 50 %, 68 veces; 40 veces (un 59 %) también ocurrieron en el parque eólico 3 rampas positivas mayores a 40 %, y 23 veces (un 34 %) en el parque eólico 7, en un intervalo de +/- 3 horas.

Npos. % (#)	Eólico 1	Eólico 2	Eólico 3	Eólico 4	Eólico 5	Eólico 6	Eólico 7
Eólico 1	100 (92)	18 (17)	23 (21)	14 (13)	18 (17)	13 (12)	15 (14)
Eólico 2	11 (17)	100 (152)	37 (56)	13 (19)	25 (38)	14 (22)	22 (33)
Eólico 3	14 (26)	37 (67)	100 (180)	23 (42)	42 (76)	23 (41)	29 (53)
Eólico 4	22 (15)	26 (18)	59 (40)	100 (68)	57 (39)	29 (20)	34 (23)
Eólico 5	11 (16)	27 (39)	49 (70)	25 (36)	100 (144)	26 (38)	33 (48)
Eólico 6	13 (10)	30 (23)	42 (32)	20 (15)	53 (40)	100 (76)	55 (42)
Eólico 7	10 (13)	23 (29)	35 (45)	14 (18)	38 (49)	36 (46)	100 (128)

Tabla 4.2: Rampas horarias positivas simultáneas. Cantidades en porcentajes y en número de casos.

Siguiente un método de Monte Carlo, se sorteó para cada otro parque un número suficientemente grande (que se tomará en 1.000) de N períodos arbitrarios de 6hs (siendo N el número de rampas mayor a 50 % en el parque en consideración) y se calculó el número de rampas mayores a 40 % en dichos N períodos. Tomando el 99 percentil de dichos 1.000 valores, se tiene un umbral de significancia al 99 % de que un conjunto particular de N intervalos de 6 hs (específicamente los centrados en las rampas mayores a 50 % en el parque en consideración) tiene asociado un número significativamente mayor de rampas de 40 % en los otros parques.

Dichos valores están indicados por los puntos rojos de las gráficas de barras. Lo que más se destaca de este resultado es una relación de ocurrencia de rampas del mismo signo entre los parques más próximos. También existe una fuerte señal de que el parque eólico 1 no comparte esta situación con el resto de los parques y el parque eólico 2 lo comparte solo parcialmente.

Cantidad de rampas positivas vinculadas en un intervalo de 3 horas. Rampas de 60'.

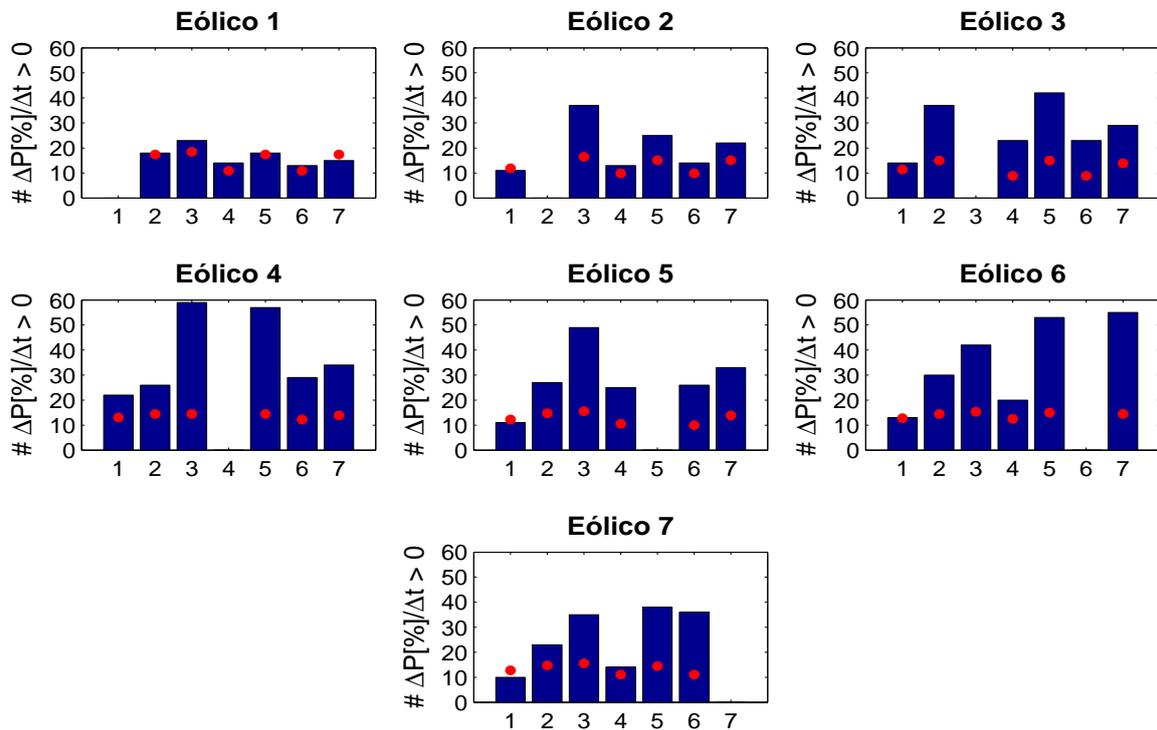


Figura 4.13: Cantidad de rampas positivas.

Nneg. % (#)	Eólico 1	Eólico 2	Eólico 3	Eólico 4	Eólico 5	Eólico 6	Eólico 7
Eólico 1	100 (65)	22 (14)	17 (11)	8 (5)	15 (10)	8 (5)	15(10)
Eólico 2	15 (17)	100 (110)	31 (34)	7 (8)	26 (29)	12 (13)	27 (30)
Eólico 3	9 (11)	28 (32)	100 (116)	22 (25)	46 (53)	19 (22)	38 (44)
Eólico 4	11 (3)	33 (9)	56 (15)	100 (27)	44 (12)	37 (10)	41 (11)
Eólico 5	10 (9)	29 (27)	41 (38)	26 (24)	100 (92)	25 (23)	41 (38)
Eólico 6	15 (7)	26 (12)	38 (18)	15 (7)	40 (19)	100 (47)	57 (27)
Eólico 7	8 (9)	22 (25)	34 (39)	12 (14)	30 (34)	28 (32)	100 (114)

Tabla 4.3: Rampas horarias negativas simultáneas. Cantidades en porcentajes y en número de casos

Cantidad de rampas negativas vinculadas en un intervalo de 3 horas. Rampas de 60'.

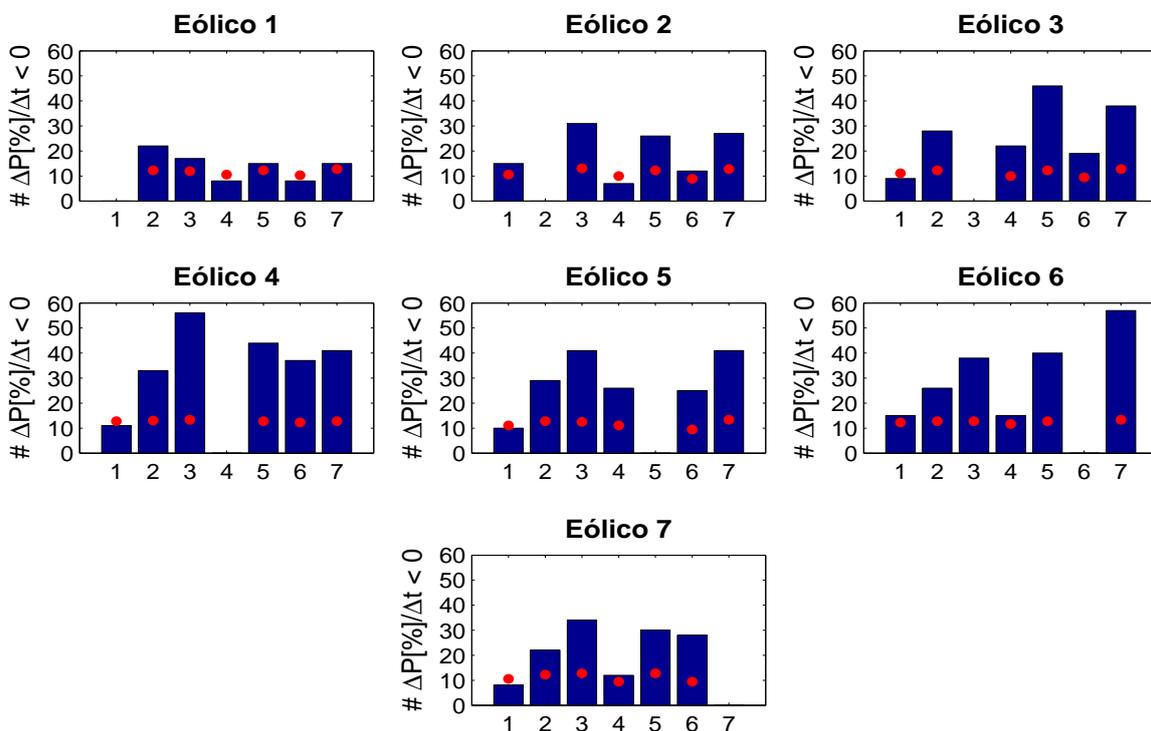


Figura 4.14: Cantidad de rampas negativas.

Para ver en más detalle este resultado de que los parques vecinos comparten las rampas del mismo signo se presentan en las siguientes figuras la cantidad de rampas que compartieron los parques más cercanos entre sí en el entorno de tres horas.

Antes que ello repasamos la ubicación geográfica de los parques eólicos que estamos considerando y les presentamos las distancias entre los mismos en la Tabla 4.4.

Eólicos	Distancia [km]
1 ⇔ 2	241
2 ⇔ 3	122
3 ⇔ 4	38
4 ⇔ 5	42
5 ⇔ 6	82
6 ⇔ 7	38

Tabla 4.4: Distancia relativa de los parques eólicos en km.

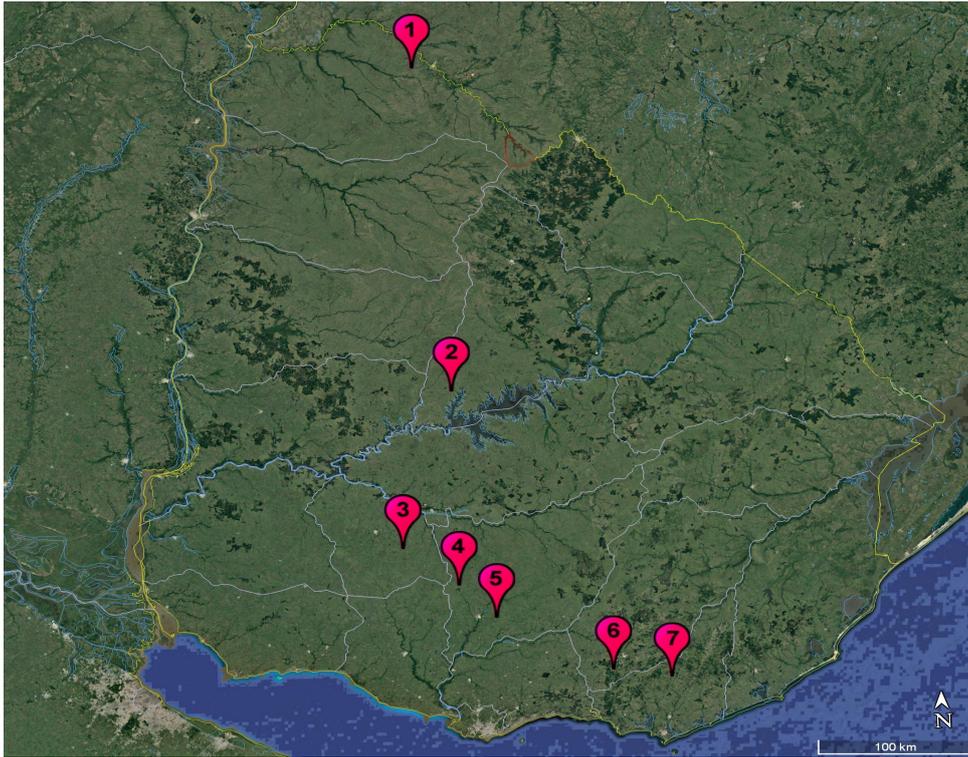


Figura 4.15: Ubicación de parques eólicos seleccionados para el estudio de rampas de viento.

A continuación, las Figuras 4.16 y 4.17 muestran la distribución de rampas (positivas y negativas) de 40 % en un intervalo de  $\pm 3$  hrs en parques contiguos a aquellos que experimentaron una rampa de 50 %.

El eje de abscisas está dividido en intervalos de 15 minutos, los valores negativos (positivos) corresponden a las rampas que ocurren con antelación (posterioridad) a la rampa de 50 % que se registró en el parque eólico que estamos mirando.

Para interpretar estos resultados se calcula el desvío estándar y la mediana de cada muestra.

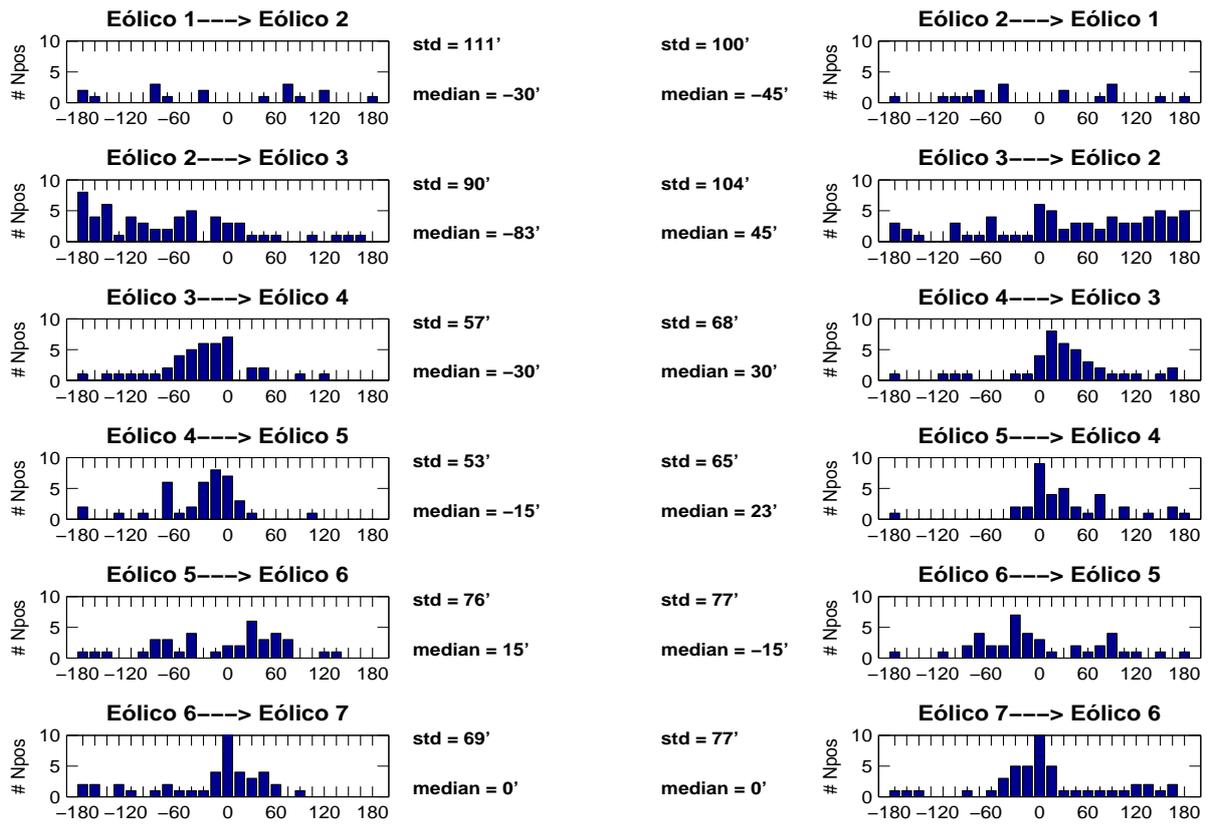


Figura 4.16: Simultaneidad de las rampas positivas entre los parques más próximos.

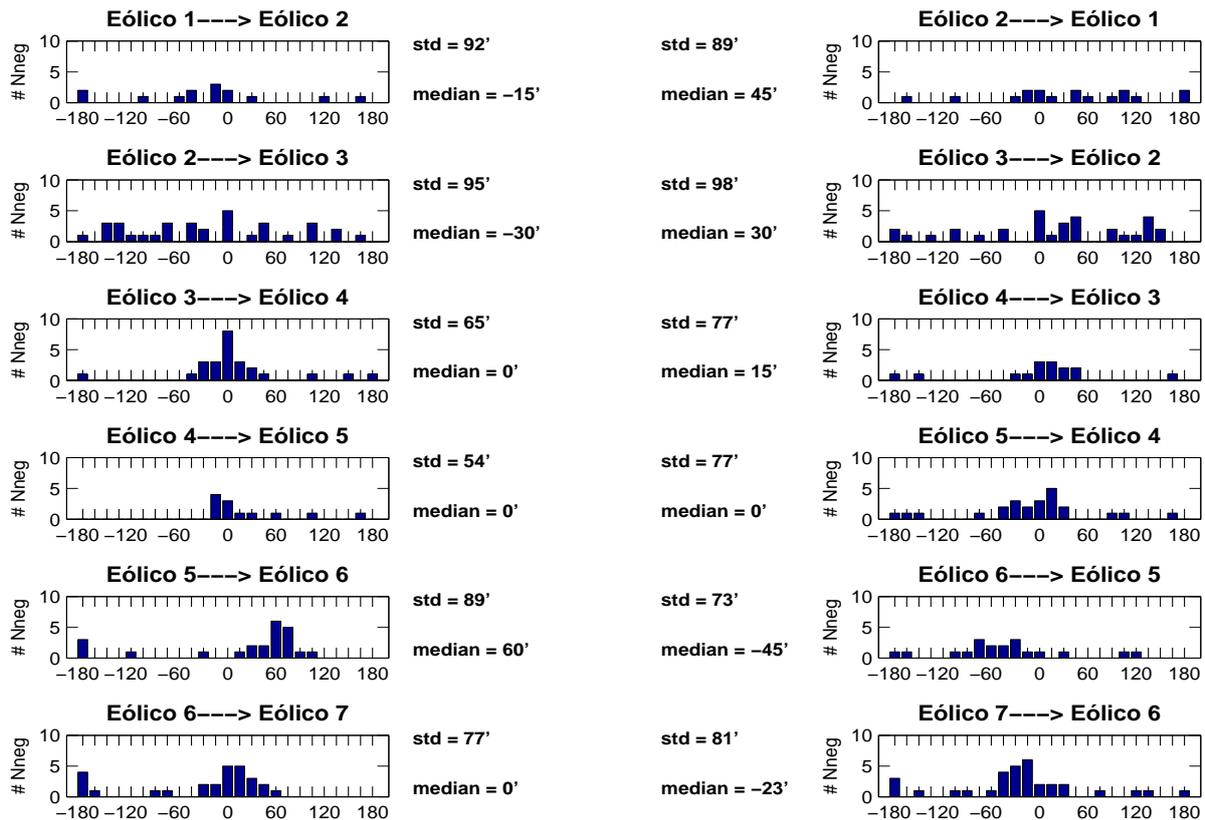


Figura 4.17: Simultaneidad de las rampas negativas entre los parques más próximos.

La Tabla 4.5 resume los desvíos estándar que se obtuvieron considerando las rampas positivas y las negativas. Los datos están ordenados considerando la distancia entre los parques, de mayor a menor.

Se observa que independientemente del signo de la rampa, la dispersión es mayor cuando los parques están más separados. Esto también se visualiza en las figuras anteriores, donde las distribuciones de rampas son más compactas entre parques cercanos, pero a medida que la distancia aumenta no se logra distinguir un desfase preferido.

Por lo tanto, al hablar de la posible existencia de simultaneidad de las rampas, la misma solo se podría llegar a considerar para aquellos parques que son muy cercanos.

Eólicos	Distancia [km]	Positivas		Negativas	
		STD $\Rightarrow$	STD $\Leftarrow$	STD $\Rightarrow$	STD $\Leftarrow$
1 $\Leftrightarrow$ 2	241	111	100	92	89
2 $\Leftrightarrow$ 3	122	90	104	95	98
5 $\Leftrightarrow$ 6	82	76	77	89	73
4 $\Leftrightarrow$ 5	42	53	65	54	77
3 $\Leftrightarrow$ 4	38	57	68	65	77
6 $\Leftrightarrow$ 7	38	69	77	77	81

Tabla 4.5: Distancia relativa de los parques eólicos en km y desvío estándar en minutos de la simultaneidad de las rampas.

La Tabla 4.6 resume la mediana de cada caso. Los valores negativos indican anterioridad y los valores positivos posterioridad. Los datos están ordenados considerando la distancia entre los parques, de mayor a menor.

Por ejemplo, si miramos la interacción entre el parque 4 y 5, el valor de -15 nos dice que las rampas positivas en el parque 5 ocurren con una antelación media de 15 minutos, mientras que el valor de 23 nos indica que las rampas positivas en el parque 4 ocurren, en media, 23 minutos después.

Eólicos	Distancia [km]	Positivas		Negativas	
		MEDIANA $\Rightarrow$	MEDIANA $\Leftarrow$	MEDIANA $\Rightarrow$	MEDIANA $\Leftarrow$
1 $\Leftrightarrow$ 2	241	-30	-45	-15	45
2 $\Leftrightarrow$ 3	122	-83	45	-30	30
5 $\Leftrightarrow$ 6	82	15	-15	60	-45
4 $\Leftrightarrow$ 5	42	-15	23	0	0
3 $\Leftrightarrow$ 4	38	-30	30	0	15
6 $\Leftrightarrow$ 7	38	0	0	0	-23

Tabla 4.6: Distancia relativa de los parques eólicos en km y mediana en minutos de la simultaneidad de las rampas.

## Capítulo 5

# Descripción meteorológica de eventos de rampas de viento

### 5.1. Curva de potencia

Previo a comenzar la descripción meteorológica de los eventos de rampa de viento, queremos mostrar un ejemplo de la curva de potencia de un parque eólico de Uruguay.

La Figura 5.1 muestra un diagrama de dispersión de los datos históricos de la velocidad del viento (abscisa) y la potencia generada (ordenada) para un parque eólico.

Los puntos amarillos son los datos observados que tienen inconsistencias obvias (registros de datos de potencia o viento en valores fijos durante un período de varias horas). Los puntos azules son los datos que quedan después de aplicar los criterios de calidad detallados en el Capítulo 2. Luego se clasifican según intervalos en las abscisas de a 0,5 m/s que se denominan "bins". Dentro de cada bins, se calcula la mediana y la desviación estándar de las potencias observadas; y los valores de potencia que están separados por más de 1.75 desviaciones estándar de la mediana se considerarán sospechosos de tener problemas de calidad.

El resultado de esta metodología son los puntos verdes y se basa en la normativa (61400-12-1., ), que proporciona una metodología uniforme que garantice consistencia, precisión y reproducibilidad en la medición y análisis del rendimiento de la potencia de turbinas eólicas.

El resultado de este control de calidad permite obtener el comportamiento del parque eólico frente a las diferentes velocidades de viento.

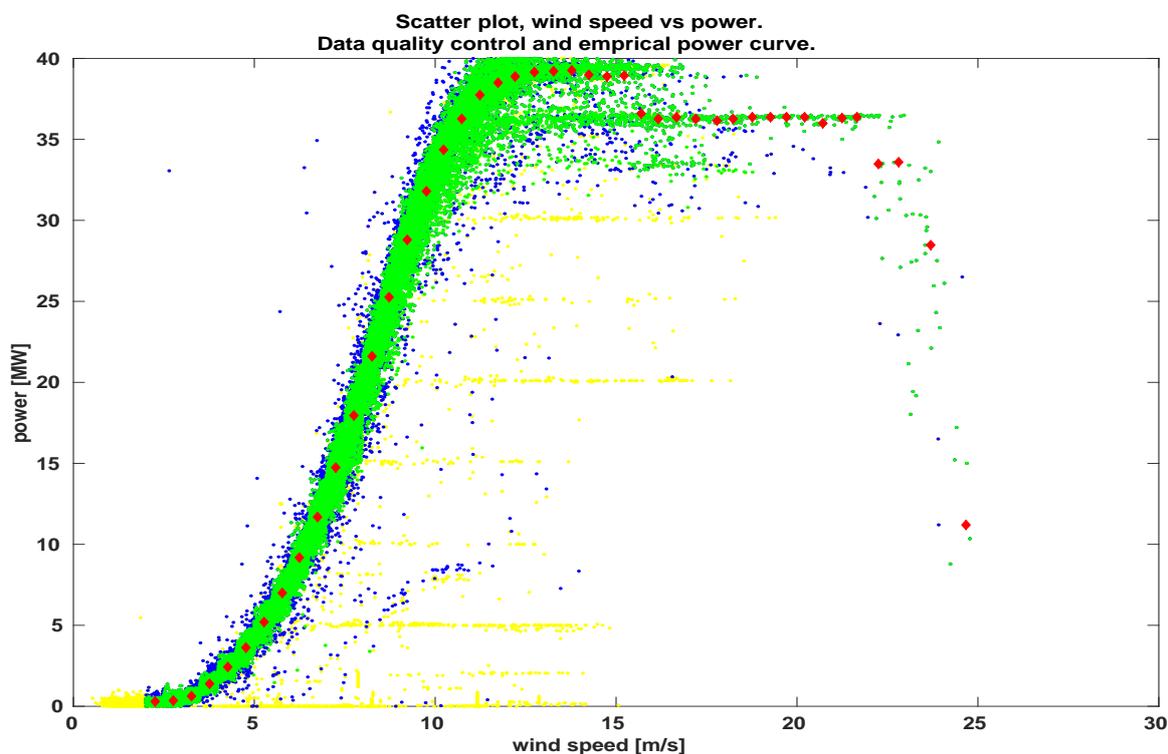


Figura 5.1: Curva de potencia característica de un parque eólico de Uruguay.

Como se puede ver, las rampas de viento quedan asociadas a las velocidades de viento que se encuentran en el rango de la pendiente de la curva, y que si bien la misma puede cambiar para cada parque eólico, en general el rango de velocidades es de 5m/s a 12m/s.

## 5.2. Selección de eventos de rampa de viento

En este capítulo se realiza la descripción meteorológica de algunos eventos de rampa de viento que se seleccionaron teniendo en cuenta la intensidad de las rampas y la simultaneidad.

La búsqueda de los eventos se realizó sobre la serie quinceminutal de las rampas horarias de los siete parques eólicos. Se tomaron ventanas de 24 horas, móviles cada 15 minutos, y se contó para cada ventana la cantidad de rampas mayores a 50%, en valor absoluto, que ocurrieron recorriendo todos los parques eólicos. Se seleccionaron las ventanas diarias que tenían la mayor cantidad de rampas, que van desde 16 a 13 rampas totales.

El resultado de esto fueron seis eventos que se describen en las siguientes secciones. Se muestra por un lado las series de potencia generada en todos los parques eólicos, con el control de calidad realizado, y señalando las rampas mayores a 50 % en valor absoluto, y por otro lado los datos de reanálisis de campo de presión y de velocidad de viento en 1000mb, con resolución de 2.5° y disponibles cada 6 horas.

Por lo tanto, considerando las horas que los datos de reanálisis están disponibles, definimos que una ventana de tiempo desde las 00GMT, del día del evento, a las 06GMT del próximo día, era suficiente para realizar el análisis meteorológico.

Para un evento se muestra el pronóstico operativo de potencia eólica en cada parque eólico.(S. de Mello, 2015)

### 5.3. Evento 12-01-2016

En este evento se registraron 13 rampas de viento mayores a 50% en valor absoluto.

Evento 12/01/2016. Rampas de 60'.

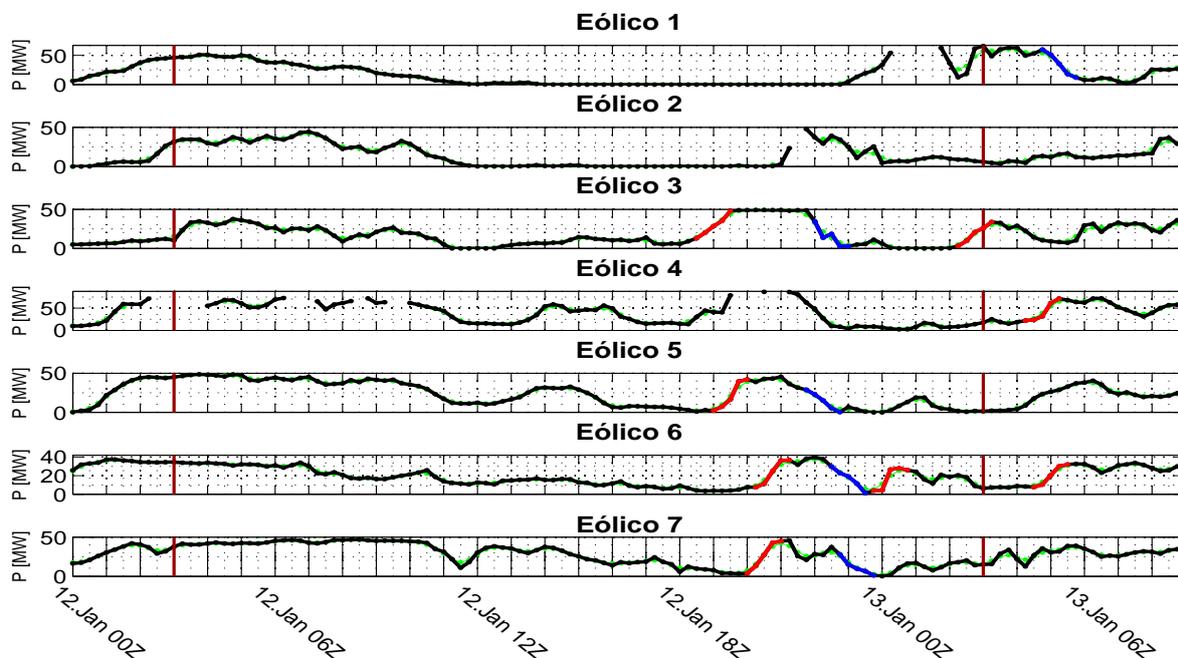


Figura 5.2: Evento de rampas horarias del 12-01-2016. Fechas en hora GMT. Pronóstico de potencia en línea naranja.

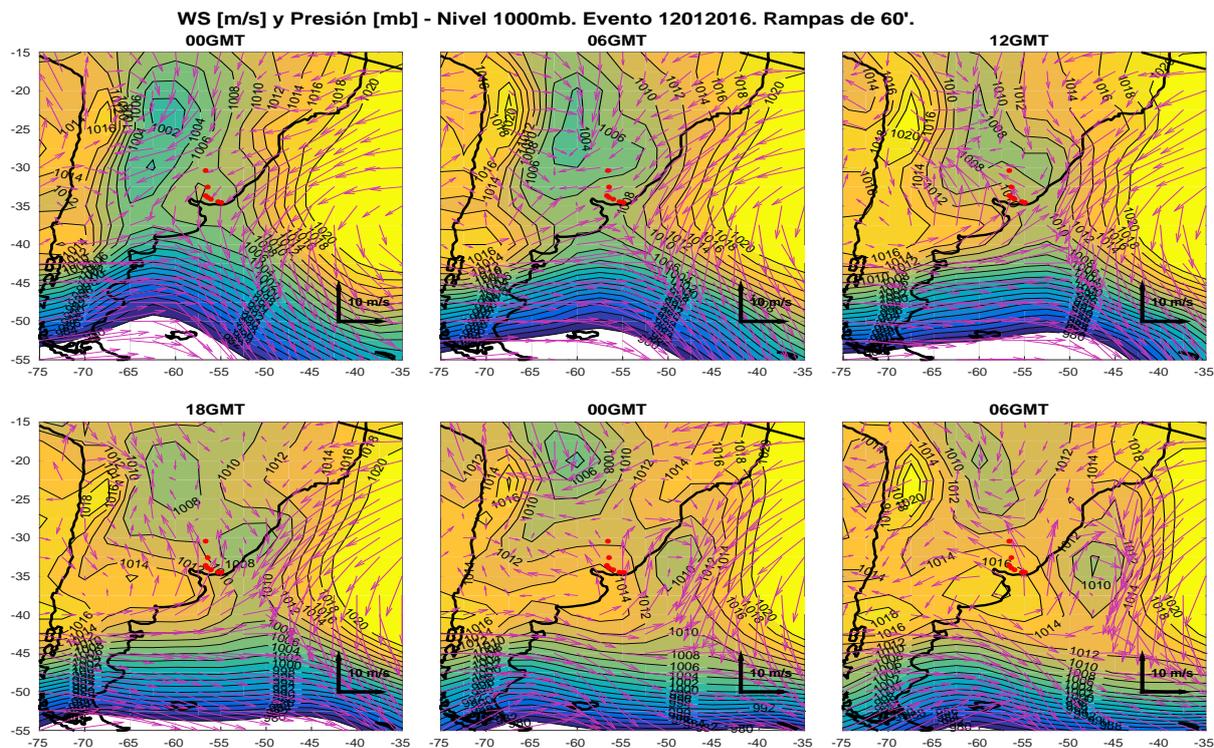


Figura 5.3: Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

En el inicio del evento se encuentra en un área bastante extensa el anticiclón del Atlántico con un valor de 1020mb, y se observa un eje de vaguada extendido desde el norte argentino hasta el sur del continente, asociado a una baja presión de origen térmico en el centro norte del territorio Argentino con un valor de 1002mb. Al oeste de esta baja presión se observa un sistema de alta presión.

Esta situación genera viento del noreste sobre el territorio uruguayo hasta las 06GMT.

Desde las 12GMT el eje de vaguada se trasladado al este de Uruguay, sobre el territorio se observa la línea frontal y luego el ingreso de la alta post frontal, que genera viento del suroeste, más intenso y que para fin del evento ha girado al sur.

Los parques eólicos el inicio del evento generaban cerca de su potencia nominal, y de a poco fueron disminuyendo su generación sin presentar rampas significativas, hasta que se registra una rampa positiva luego de las 18GMT cuando la línea frontal ya se encuentra al norte de Uruguay y la intensidad del viento ha aumentado.

El primer parque eólico que registra una rampa hacia arriba es el tres, que se encuentra más al oeste del territorio. Luego los parques registran una rampa negativa, que se puede relacionar con una disminución en el viento en el mapa de 00GMT del día próximo del evento.

En resumen, en este evento se observa el pasaje de un sistema frontal sobre el país, donde los parques al sur del Río Negro registraron una rampa ascendente y una descendente con aproximadamente tres horas de diferencia. El parque eólico 2 muestra una señal menos clara de esta situación, mientras que en el parque eólico 1 se observa con un poco más de retraso.

### 5.4. Evento 01-11-2016

En este evento se seleccionaron 13 rampas de viento mayores a 50 % en valor absoluto.

Evento 01/11/2016. Rampas de 60'.

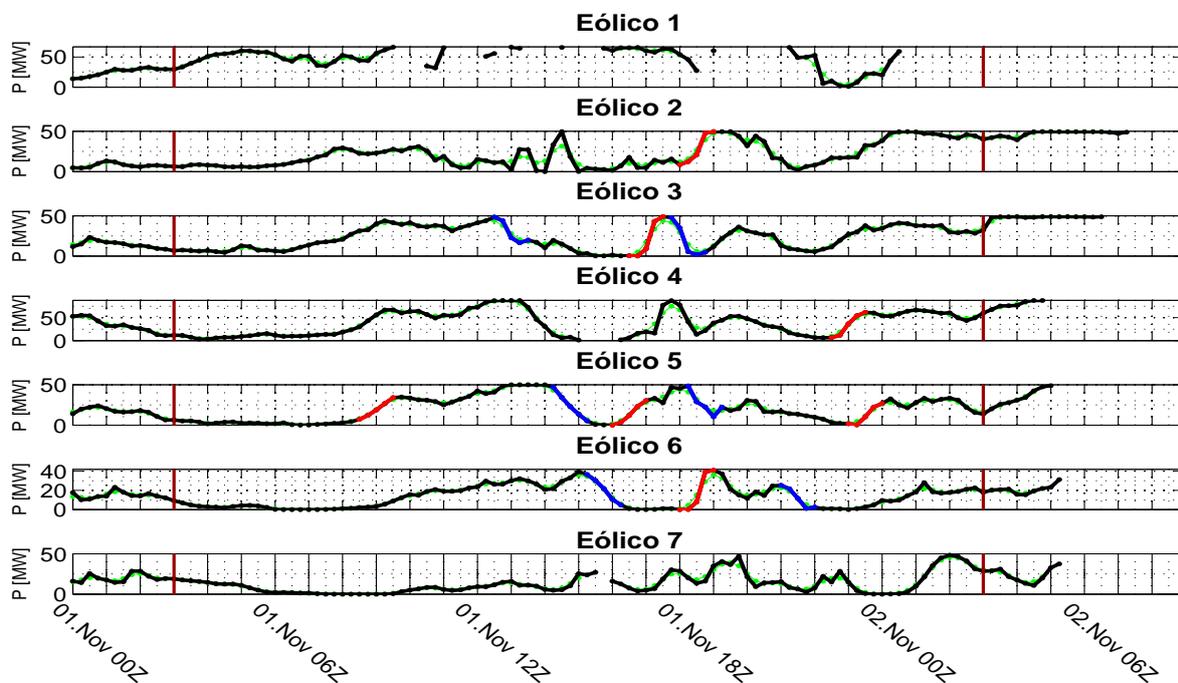


Figura 5.4: Evento de rampas horarias del 01-11-2016. Fechas en hora GMT.

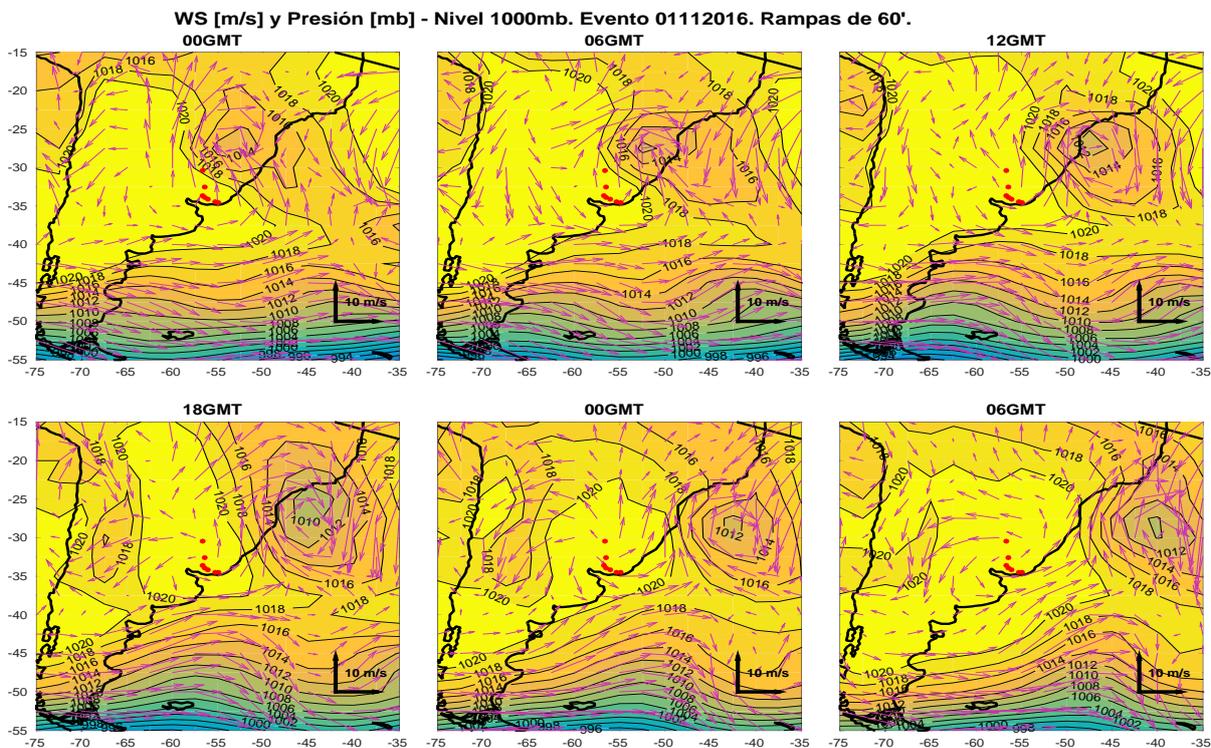


Figura 5.5: Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

A las 00GMT del día del evento se observa al norte del territorio uruguayo un sistema de baja presión, con centro en 27°S-52°O y valor de 1014mb, que luego se desplaza hacia el este con una leve profundización.

Al oeste de esta baja presión, sobre el territorio uruguayo y centro de Argentina se encuentra una alta presión que avanza hacia el este. La combinación de estos dos sistemas generan que sobre el país el viento sea del sur hasta las 12GMT del día del evento y más intenso al norte del Río Negro que en la zona costera.

En 40°S a la altura de la ciudad de Bahía Blanca, se observa una línea frontal que se mantiene para todo el evento.

Las primeras rampas de potencia son negativas y ocurren entre las 12GMT y las 18GMT, momento donde el sistema de alta presión genera una disminución de la velocidad del viento sobre el territorio. Luego en el entorno de las 18GMT se observa en los parques del sur rampas positivas con una posterior rampa negativa. Al final del evento, cerca de las 21hrs local, se registran rampas positivas y los parques mantienen su generación cerca de su potencia máxima.

El sistema de alta presión se mantiene sobre el territorio para el resto de las horas.

Se observa que en el parque eólico 1, ubicado al norte del país, no se registraron rampas, el parque siempre se mantuvo generando cerca de su potencia nominal. Esta situación es un ejemplo de lo que veíamos en los capítulos anteriores de que este parque no se comporta igual al resto de los parques.

En resumen, desde el punto de vista meteorológico, las rampas de viento se vieron influenciadas por un sistema de alta presión que ingresó por el oeste del país.

### 5.5. Evento 15-04-2016

En este evento se registraron 14 rampas de viento mayores a 50% en valor absoluto.

Evento 15/04/2016. Rampas de 60'.

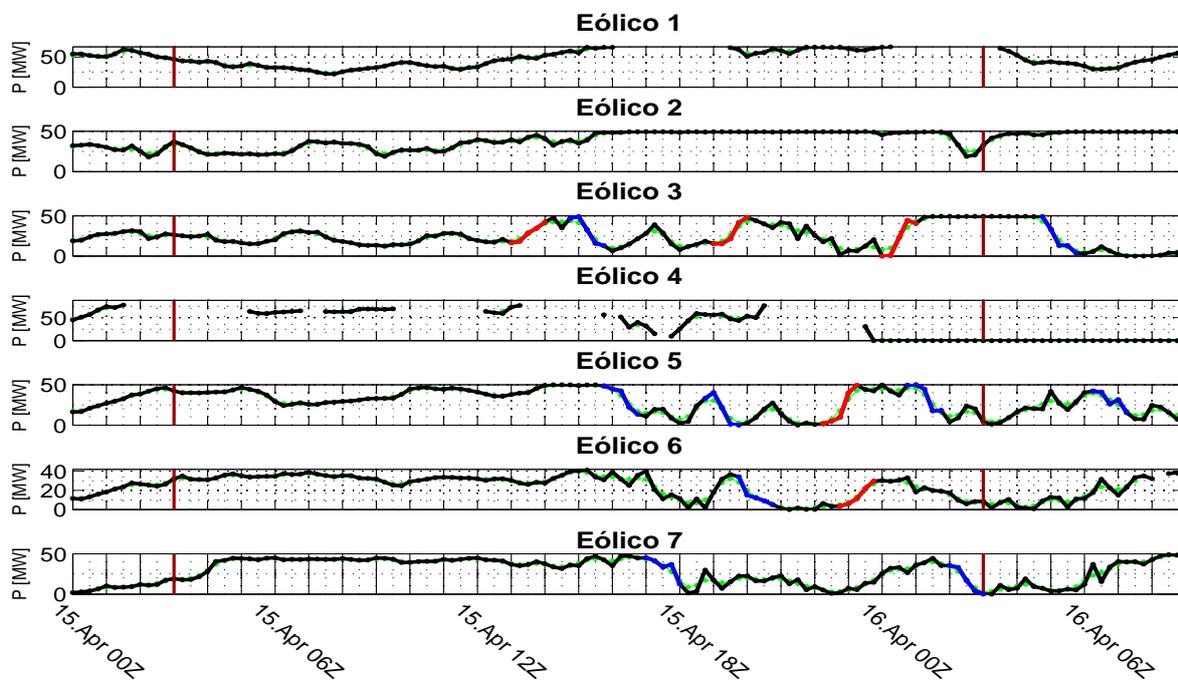


Figura 5.6: Evento de rampas horarias del 15-04-2016. Fechas en hora GMT.

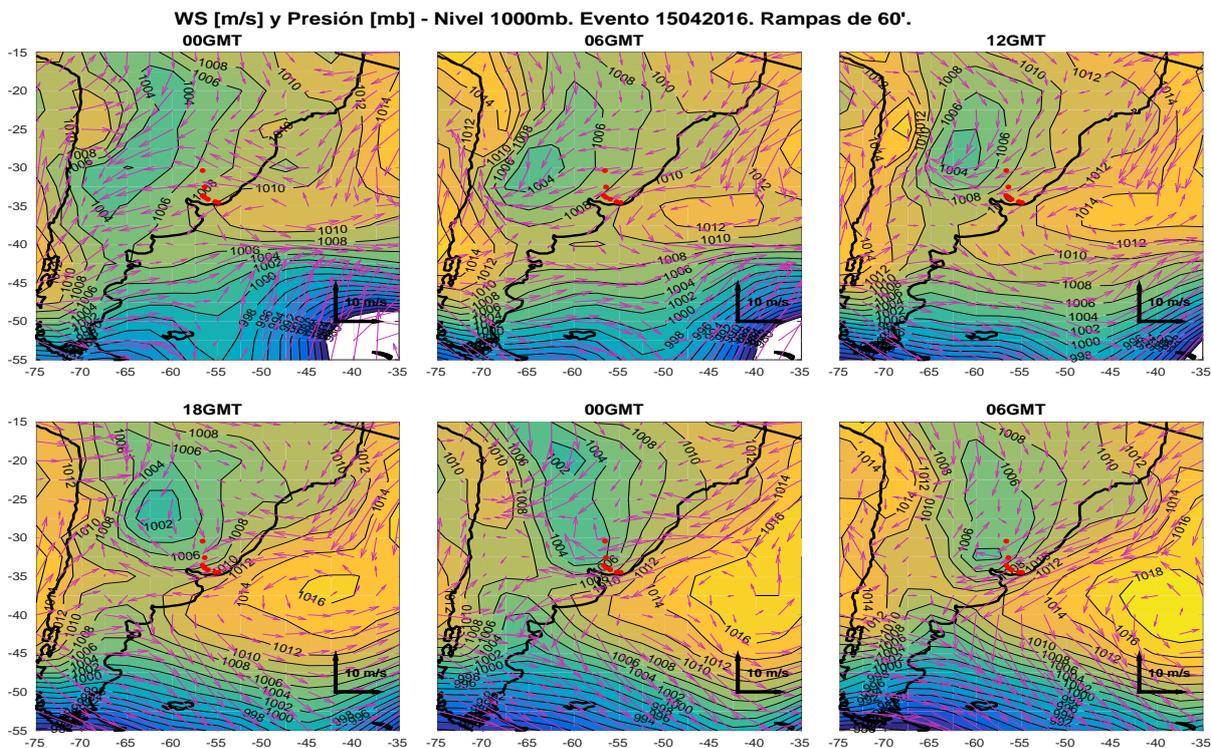


Figura 5.7: Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

La situación sinóptica del día muestra una línea frontal en 40°S, un sistema de baja presión en un área bastante extensa en el centro norte argentino, que se mantiene durante todo el evento de rampas. También se observa una alta presión al este del territorio uruguayo.

Este patrón genera viento del este sobre el territorio uruguayo girando al noreste para las 12GMT.

Los parques se encuentran generando cerca de su potencia nominal hasta que luego de las 12GMT se detectan algunas rampas.

En el entorno de las 18GMT se observan rampas hacia abajo. Observando los campos de velocidad y presión, vemos que la línea frontal se ubica sobre 35°S, la misma nunca llega a atravesar el territorio ya que la combinación de la baja y alta presión, ambas estacionarias y profundizándose, no permiten el avance de la zona de convergencia.

Los dos parques que se encuentran al norte del Río Negro no presentaron rampas y durante todo el evento y estuvieron generando cerca de su potencia máxima. La situación sinóptica en esta región no cambió, la baja presión del noroeste argentino se mantuvo durante todo el evento.

Los parques al sur del Río Negro sintieron los efectos de la zona de convergencia que no logró avanzar sobre el territorio.

### 5.6. Evento 18-03-2016

En este evento se registraron 16 rampas mayores a 50% en valor absoluto.

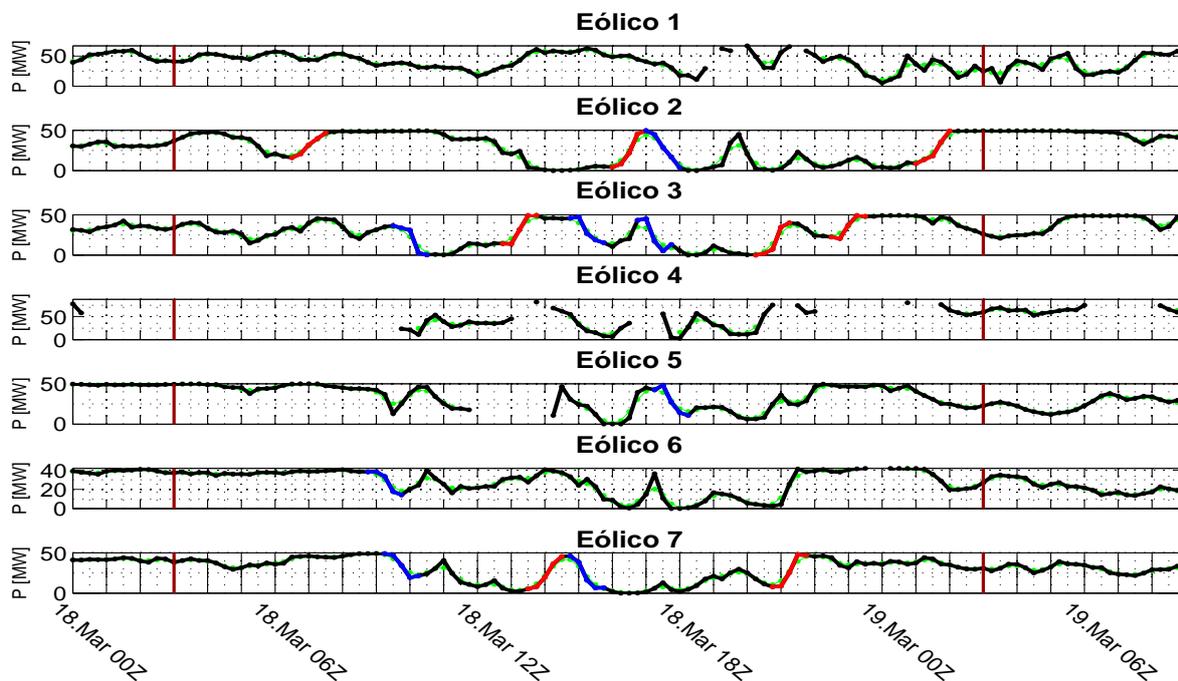


Figura 5.8: Evento de rampas horarias del 18-03-2016. Fechas en hora GMT.

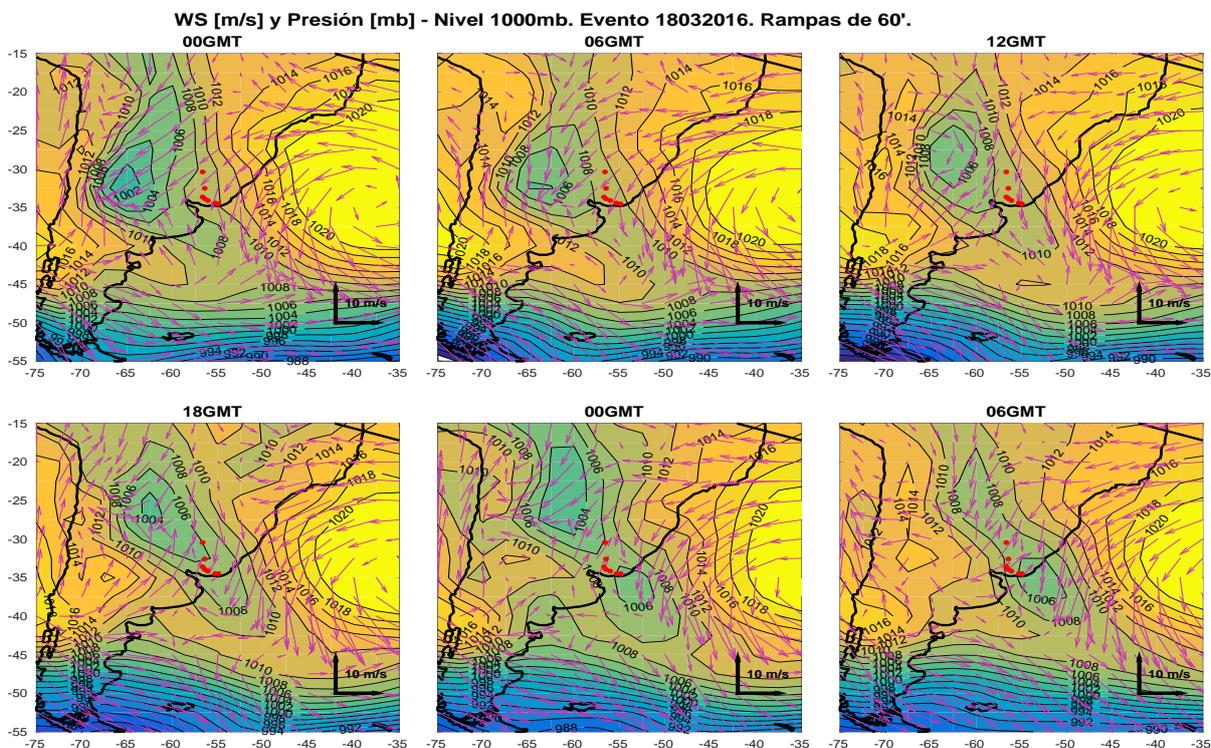


Figura 5.9: Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

En el centro de Argentina se observa un sistema de baja presión de 1002mb, al oeste de éste un anticiclón atraviesa la Cordillera Andina y al este se encuentra el anticiclón del Atlántico.

Esta combinación se mantiene durante todo el evento y se traslada hacia el este, intensificándose cada sistema. Con esta traslación los vientos sobre el territorio van rotando. Inicialmente son del este, rotando al norte hasta que la zona de convergencia se posiciona sobre el territorio.

Antes de las 12GMT se observan algunas rampas negativas, el viento sobre el territorio es del norte.

Entre las 12GMT y las 18GMT se registran rampas positivas y negativas, para las 18GMT la zona de convergencia se encuentra sobre el territorio.

Luego las rampas que ocurren son positivas y los parques se mantienen generando al tope de su capacidad, mirando las dos últimas cartas de superficie vemos que el centro de una baja presión se encuentra sobre la zona costera del país, con vientos del suroeste.

### 5.7. Evento 19-02-2016

En este evento se registraron 15 rampas de viento mayores a 50% en valor absoluto

Evento 19/02/2016. Rampas de 60'.

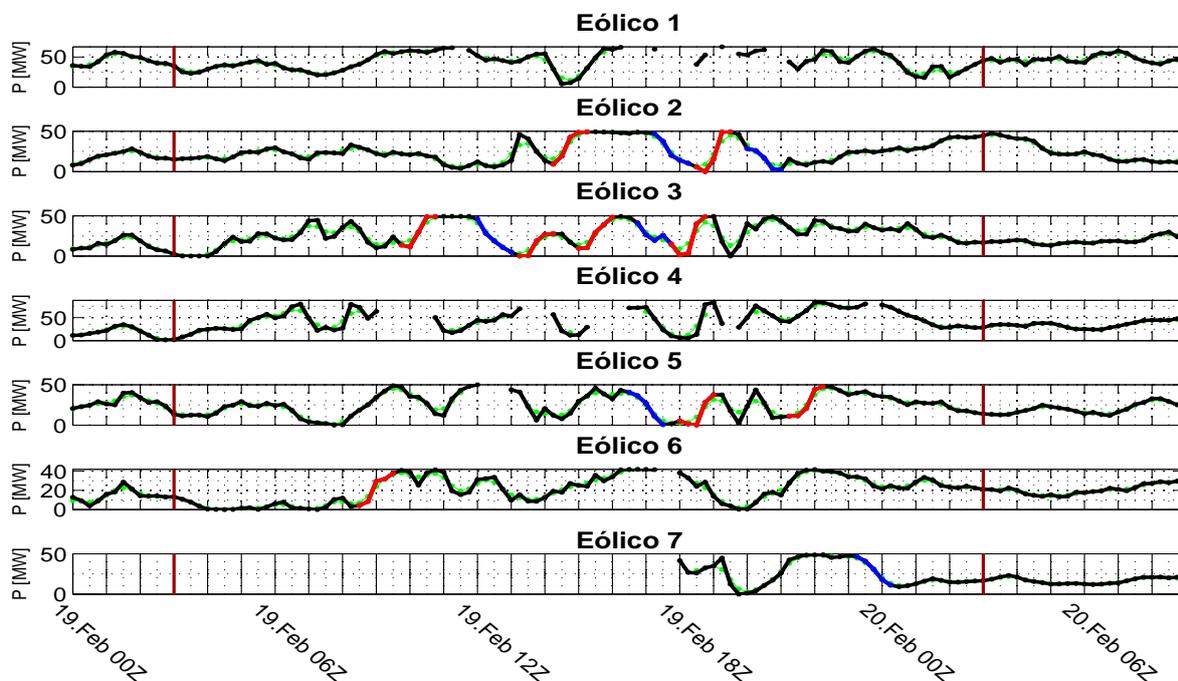


Figura 5.10: Evento de rampas horarias del 19-02-2016. Fechas en hora GMT.

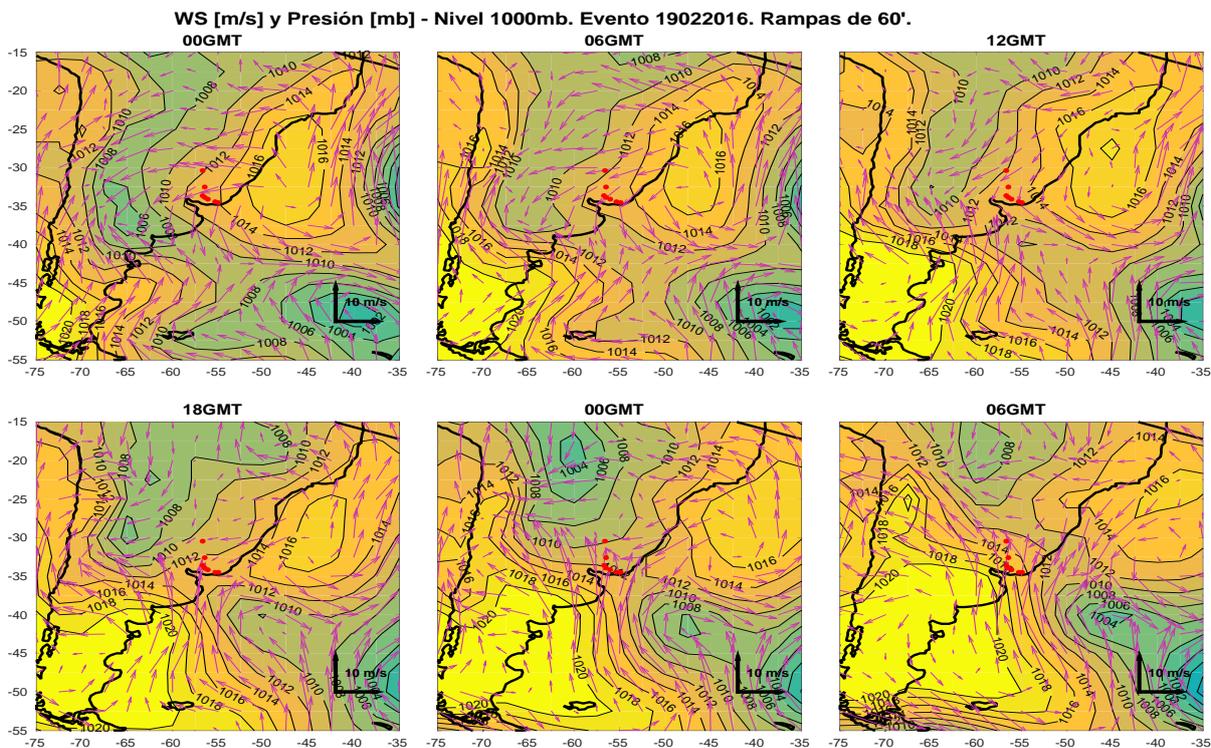


Figura 5.11: Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

Al inicio del evento se observa al este de Uruguay un sistema de alta presión de 1016mb, al oeste una baja presión de 1006mb, esto genera que los vientos sean del este, rotando hacia el noreste a las 12GMT.

La línea frontal al sur del continente, en 40°S, asociada a un sistema de baja presión con centro en 50°S-40°O e intensidad de 1002mb, avanza hacia el noreste llegando a las 12GMT al Río de la Plata. Luego atraviesa todo el territorio uruguayo dando lugar a que el viento sea desde el sur debido al ingreso de la alta presión pos frontal.

Entre las 12GMT y las 18GMT momento en que la zona de convergencia esta sobre el territorio se registran las rampas positivas y negativas con menos de dos horas de diferencia, en particular el parque eólico 3, ubicado más al oeste, es el que muestra más rampas.

### 5.8. Evento 24-01-2017

En este evento se registraron 13 rampas de viento mayores a 50% en valor absoluto.

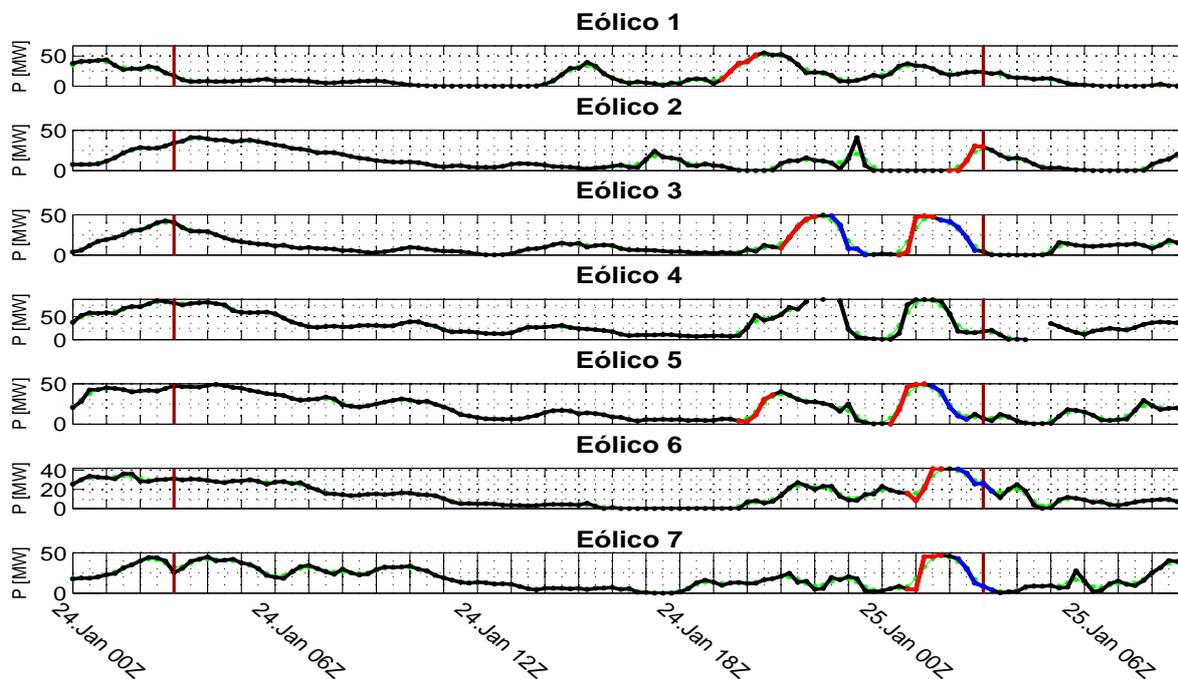


Figura 5.12: Evento de rampas horarias del 24-01-2016. Fechas en hora GMT.

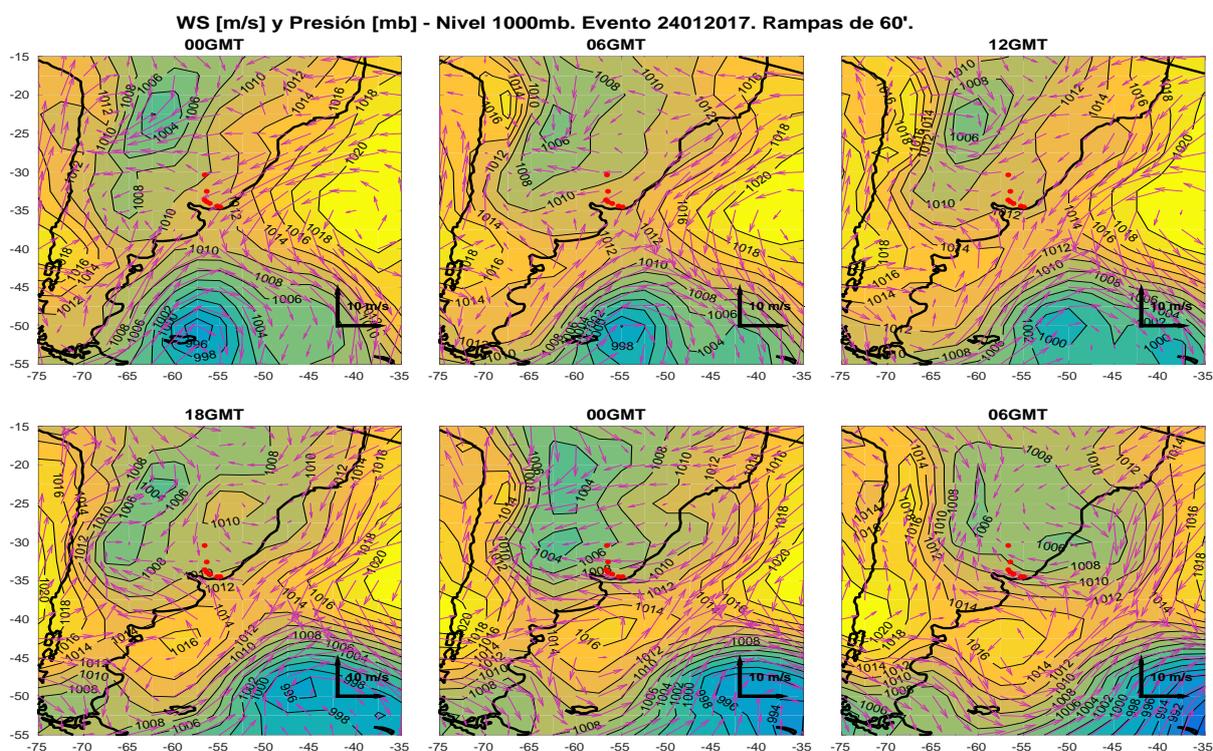


Figura 5.13: Campos de presión atmosférica y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

En el norte de Argentina se observa un sistema de baja presión de 1004mb cuasi estacionario. Más al sur en 52°S-57°O se encuentra otro sistema de baja presión de 996mb que se traslada al este y que tiene asociado una rama fría que también se traslada de manera que logra llegar al sur del territorio uruguayo.

Desde el inicio del evento la generación de los parques disminuye, y se observa que entre las 12GMT y 18GMT, la generación es baja debido a la influencia de la zona de convergencia que se encuentra sobre el país.

Luego para las 00GMT del próximo día del evento, se observa una situación que se puede aproximar a un bloqueo atmosférico, donde los parques al sur del territorio reciben viento del este, y registran rampas positivas y negativas con aproximadamente dos horas de diferencia, mientras que los parques al norte del Río Negro quedan más cerca del centro de baja presión y verifican menos rampas.

## 5.9. Eventos en parque eólico 1

Hasta ahora el estudio estadístico y la descripción meteorológica de los eventos que registraron más rampas de viento nos han dejado la idea que el parque eólico 1, ubicado al norte del territorio uruguayo no acompaña el comportamiento del resto de los parques. Por ello vamos a analizar un par de eventos en este parque, que registraron una cantidad de rampas significativas el entorno de un día.

### 5.9.1. Evento 05-10-2016

Se registran cuatro rampas mayores a 50% en valor absoluto en el parque eólico 1, también otros parques presentan rampas.

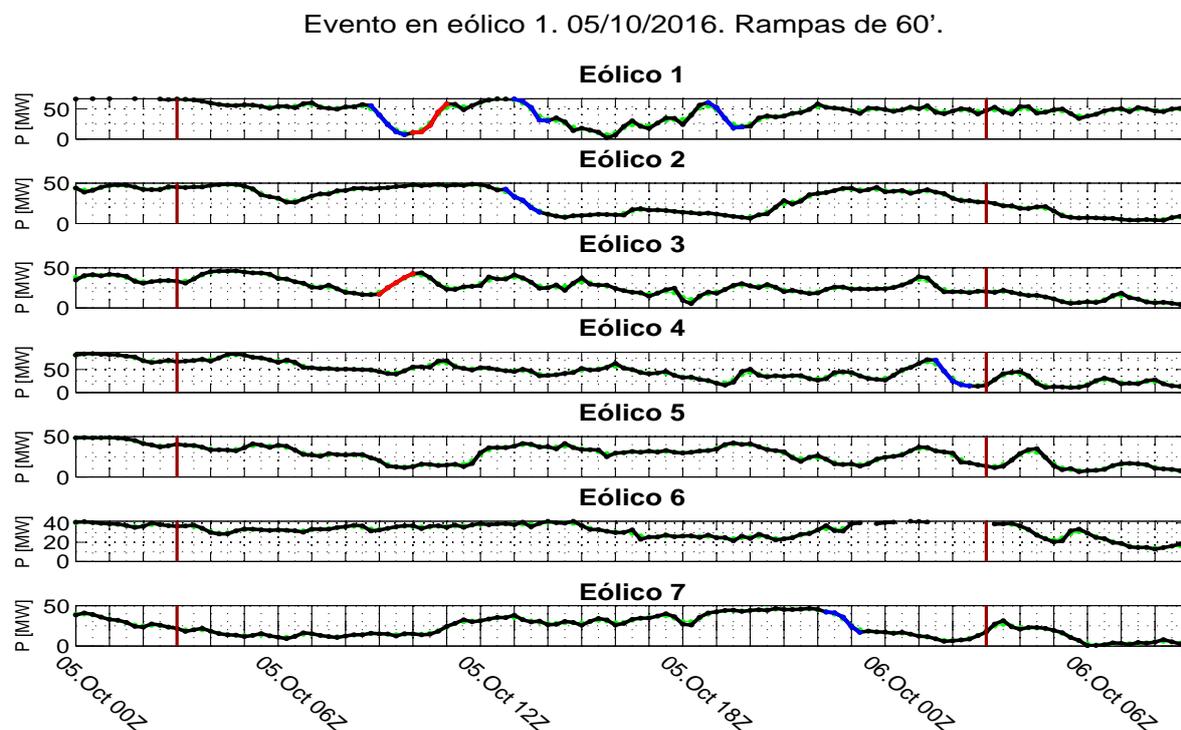


Figura 5.14: Evento de rampas horarias del 05-10-2016 en el parque eólico 1. Fechas en hora GMT.

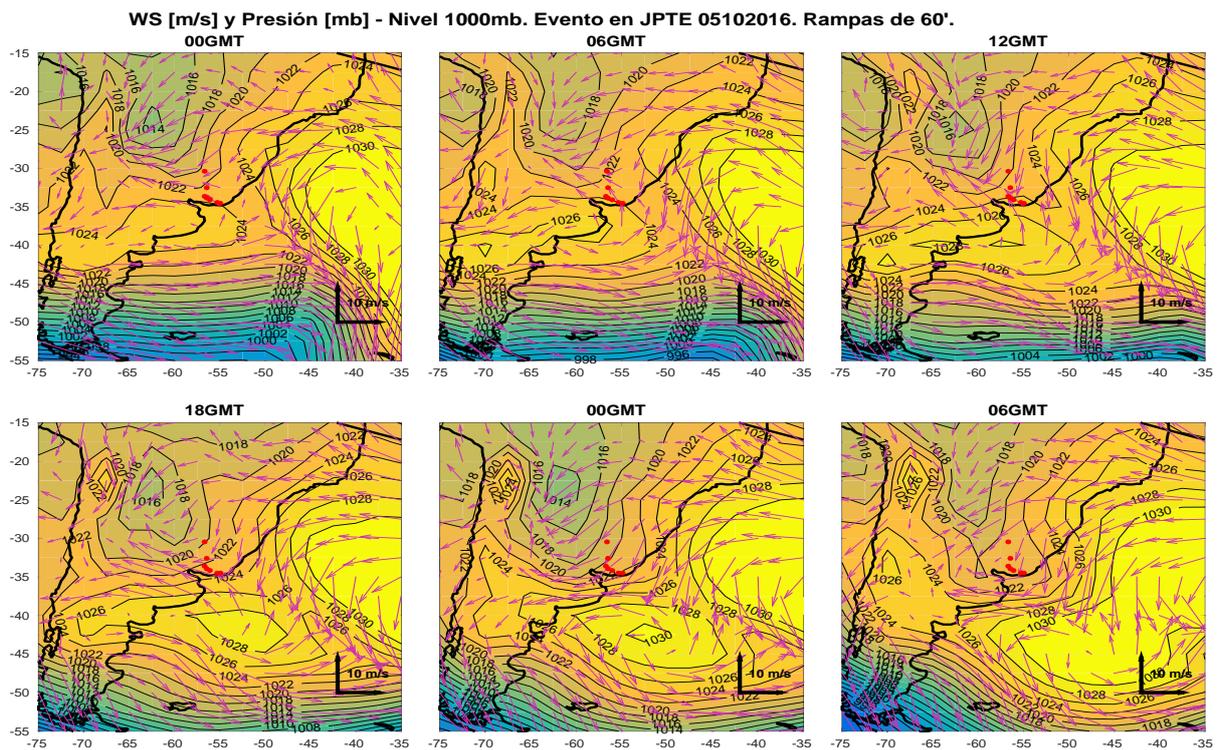


Figura 5.15: Campos de presión y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

Se observa un sistema de baja presión estacionario en el norte argentino, una alta presión al sur del continente y la línea frontal en 40°S a las 00GMT del día del evento.

La alta presión se traslada al este, y con ella la línea frontal atraviesa el territorio del país.

Las rampas en el parque eólico 1 se registran en el entrono de las 12GMT, el viento en ese entonces es del norte debido a la presencia de la baja presión y al anticiclón del Atlántico. Mientras tanto los parques del sur se ven bajo los efectos del anticiclón pos frontal y reciben viento del sur rotando al este y norte según vaya avanzando el sistema de alta presión.

### 5.9.2. Evento 24-04-2016

Se registran cinco rampas de viento en el parque eólico 1 mayores a 50% en valor absoluto. Evento en eólico 1. 24/04/2016. Rampas de 60'.

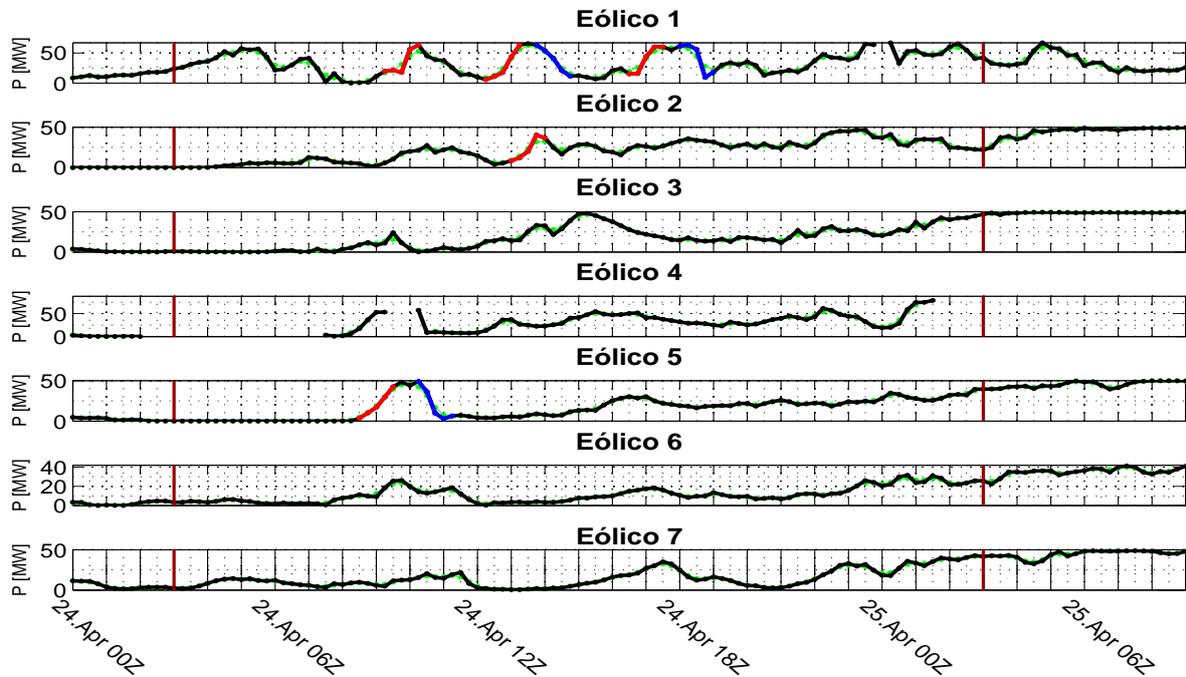


Figura 5.16: Evento de rampas horarias del 24-04-2016 en el parque eólico 1. Fechas en hora GMT.

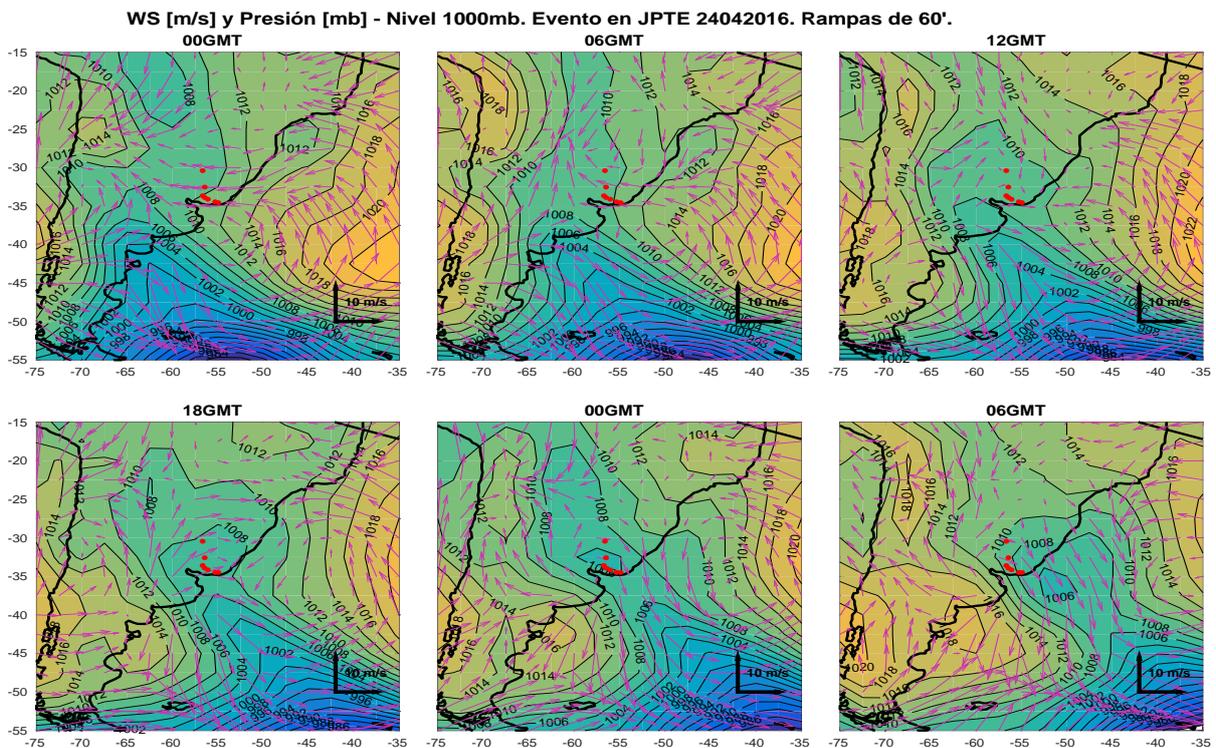


Figura 5.17: Campos de presión y viento en 1000mb. Datos de reanálisis en hora GMT.

Se observa un sistema frontal que se extiende desde el norte-centro de Argentina, hasta el sur llegando al océano Atlántico asociado a una baja presión en 55°S - 55°O con valor de 994mb.

De 12GMT a 18GMT el sistema frontal atraviesa el país, generando cambios en la dirección e intensidad del viento. Las rampas en el parque eólico 1 se registran en el entorno de este pasaje. El resto de los parques muestra una señal más suave de esta situación. Luego todo el país queda bajo la influencia de la alta pos frontal.

## 5.10. Pronóstico de generación eólica

En esta sección mostraremos uno de los eventos descrito anteriormente junto con el pronóstico de potencia eólica para cada parque.

El pronóstico corresponde a la inicialización de las 00GMT, y queda disponible a las 9 horas locales. El post procesamiento de los datos de viento que se obtienen con el WRF, consiste en transformar la velocidad del viento en potencia considerando la curva de los aerogeneradores en cada parque eólico. En la Figura 5.18 se muestra en línea naranja el pronóstico correspondiente al día de estudio.

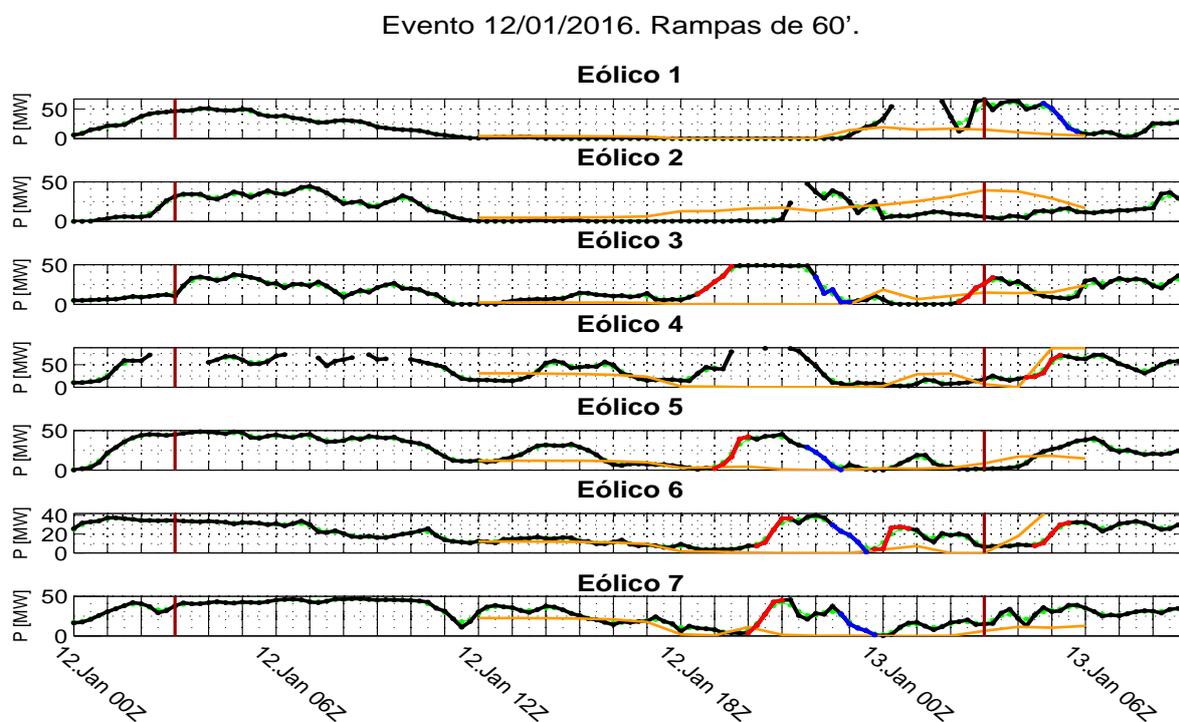


Figura 5.18: Evento de rampas horarias del 12-01-2016 junto con el pronóstico de generación de potencia eólica.

Podemos observar que para las horas disponibles del pronóstico, en general se conserva la evolución del recurso eólico, pero no se logra describir en detalle la ocurrencia de las rampas positivas y negativas que observamos estaban asociadas al pasaje de un sistema frontal por el país.

## Capítulo 6

# Conclusiones y Trabajos Futuros

Una mejor comprensión del recurso eólico es importante para garantizar la seguridad y la gestión operativa del sistema eléctrico y la red.

Este trabajo que realizamos ha contribuido de manera muy importante para comprender los eventos de rampa de viento que ocurren en los parques eólicos instalados en Uruguay y las condiciones meteorológicas asociadas, objetivo general del trabajo.

La gestión del sistema eléctrico tiene especial interés en las rampas rápidas, por otro lado los registros disponibles tienen una frecuencia quinceminutal, por lo que el estudio se limitó al análisis de rampas de 15', 30' y 60 minutos de duración.

En el análisis climatológico de las rampas se identificó que -para una misma intensidad y duración- las rampas positivas son levemente más frecuentes que las negativas, con excepción de las rampas de 60' de duración y de 20 % y 30 % de intensidad, en que se da lo contrario.

En particular, se analizó la incidencia de la hora del día sobre las rampas, donde se encuentra que las rampas positivas son más frecuentes en la hora de la tarde, mientras que el máximo diurno de las rampas negativas se da en horas de la madrugada. Este resultado es consistente con el conocido ciclo diurno de la intensidad del viento –y la potencia– que tiene un mínimo durante las horas posteriores al mediodía y un máximo durante la noche, asociado al pulso diario de crecimiento y decrecimiento del espesor de la capa límite atmosférica (Cornalino, 2015). En las horas del día el proceso de mezcla transfiere momento en altura y frena el viento a la altura del buje de generación. (Gutierrez, 2015)

También en este punto se pudo observar, que el pico máximo de las rampas negativas es menos pronunciado, abarcando buena parte de la madrugada, mientras que para las rampas positivas se observa puntualmente a las 20 horas. El análisis de armónicos logra situar el pico de rampas negativas poco después de las 5am y para las rampas positivas en el entorno de las 20 horas.

Con las escalas de tiempo e intensidad que se trabajaron y con el rango de velocidades en que los aerogeneradores son sensibles a las variaciones del viento, los eventos de rampas parecen estar dominados por pasajes de frentes, según surge de los análisis meteorológicos. Recordar que los eventos se definieron en función de un número alto de rampas distribuidas en el territorio.

Se logró detectar una relación de las rampas horarias en distintos parques solamente cuando los mismos distan menos de 100 km. Se observa además que las antelaciones son siempre menores a 1 hora. Con este criterio, el parque eólico 1, ubicado más al norte y alejado, muestra un comportamiento notoriamente diferente, y el parque eólico 2 también se muestra bastante desacoplado.

Sin embargo, al analizar las situaciones sinópticas que generan eventos de rampas en dichos parques no se encontraron diferencias sustanciales con los fenómenos que las generan en los parques más al sur, simplemente que la distancia entre parques hace que el posicionamiento relativo de los mismo respecto de los sistemas transientes sea diferencial. Por tanto, la distancia entre los parques por sí sola explica la diferencia de comportamiento de los mismos, en particular los parques 1 y 2. Según el posicionamiento y las trayectorias de los sistemas de tiempo se afecta a los parques de diversa manera, por supuesto cuanto más cerca, más semejantes son los comportamientos.

Una mejor comprensión de las rampas de viento a gran escala pueden en última instancia conducir a una mejor previsión de la producción de energía del viento. En particular, estos eventos de rampa son una de las preocupaciones de los operadores del sistema eléctrico, poder identificarlos es útil para crear algoritmos de evaluación que puedan pronosticar mejor las rampas de generación y su impacto económico. Por ese motivo se exploró la capacidad de los pronósticos operativos actualmente existentes de capturar dichos eventos de rampa. Los casos analizados, de los cuales se presenta uno solo, muestran que los pronósticos (que tienen frecuencia horaria) capturan la evolución de la situación sinóptica pero no las rampas en sí asociadas al pasaje de las zonas de convergencia frontal que

explican la mayor parte de los eventos estudiados.

### **A futuro:**

Pronósticos de mayor resolución temporal parecen ser necesarios para capturar los eventos estudiados.

Si se quiere analizar rampas más cortas y pronunciadas, por ejemplo asociadas a eventos convectivos severos, entonces se debe muestrear la potencia de los parques a una mayor frecuencia.

Finalmente, se podrían realizar más investigaciones para explorar los posibles eventos de rampa, que pueden contribuir a una mejor comprensión de las causas de la rampa de la energía eólica.

Contar con una buena base de datos es imprescindible. Los resultados se podrían mejorar sustancialmente considerando el histórico de los parques eólicos instalados en diferentes zonas del país.

A pesar de haber obtenido buenos resultados, estos se pueden mejorar considerando otros datos como son las medidas de velocidad de viento específicas en cada parque eólico.

---

## Bibliografía

- 61400-12-1. IEC. Wind turbines. *Part 12: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. First edition. 2005-12.*
- AWS Truewind, L. (2008). *Analysis of West Texas Wind Plant Ramp-up and Ramp-down Events.* Albany, NY 12205.
- Barros, V. (1986). Información meteorológica básica para el aprovechamiento de la energía solar y eólica.
- Bianco, L. (2016). A wind energy ramp tool and metric for measuring the skill of numerical weather prediction models. *American Meteorological Society.*
- Cataldo, J. (2010). [www.fing.edu.uy/sites/default/files/2011/3748/mapa-eolico.pdf](http://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2011/3748/mapa-eolico.pdf).
- Cornalino, E. (2015). Tesis, descripción del comportamiento del recurso eólico nacional para su modelado dentro del sistema eléctrico. Master's thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Durañona, V. (2015b). Tesis, clima de vientos extremos en Uruguay. Master's thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Gutierrez, A. (2015). Description of intensity of turbulence it in dependence with stability regime at swept area of wind turbines blades heights. *14th International Conference on Wind Engineering – Porto Alegre, Brazil – June 21-26, 2015.*
- Hernández, H. (1971). Frecuencia absoluta de ráfagas de viento registradas en la estación meteorológica frente al puerto de Montevideo (1906 - 1970). page 15.
- Kanamitsu, B. D. M. (2002). NCEP - DOE AMIP-II REANALYSIS (R-2). *American Meteorological Society.*

Morandi, L. (1940). *Calmas relativas y vientos impetuosos en el clima de Montevideo*.

Morandi, L. (1945). *Frecuencia de las distintas velocidades horarias del viento durante el quinquenio 1936 -1940, y observadas en el Observatorio del Prado (Servicio Meteorológico del Uruguay)*.

Ohba, M. (2015). Impacts of synoptic circulation patterns on wind power ramp events in east japan. [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene).

Programa de Energía Eólica de Uruguay (PEEU) (2009). [www.energiaeolica.gub.uy/index.php?page=metodologia](http://www.energiaeolica.gub.uy/index.php?page=metodologia).

Ricaldoni, J. (1979). *Estudio de vientos en Uruguay, Memoria de las XX Jornadas Sud-americanas de Ingeniería Estructural y VI Simposio Panamericano de Estructuras*. Academic Press, Julio 22-28 Córdoba, Argentina, pp.17.

S. de Mello, G. Cazes, A. G. (2015). Operational wind energy forecast with power assimilation. *14th International Conference on Wind Engineering – Porto Alegre, Brazil – June 21-26, 2015*.

UTE. <http://www.ute.com.uy/SgePublico/ConsComposicionEnergeticaXFuente.aspx>.

Vieira, S. (1969). *Tiempo y clima, nuestra tierra, montevideo, uruguay*. Technical report, Institut für Thermische Energietechnik, Universität Kassel.

# Anexos

## Anexo A

### Resultados rampas 15'

RAMP-DOWN. Eólico 1

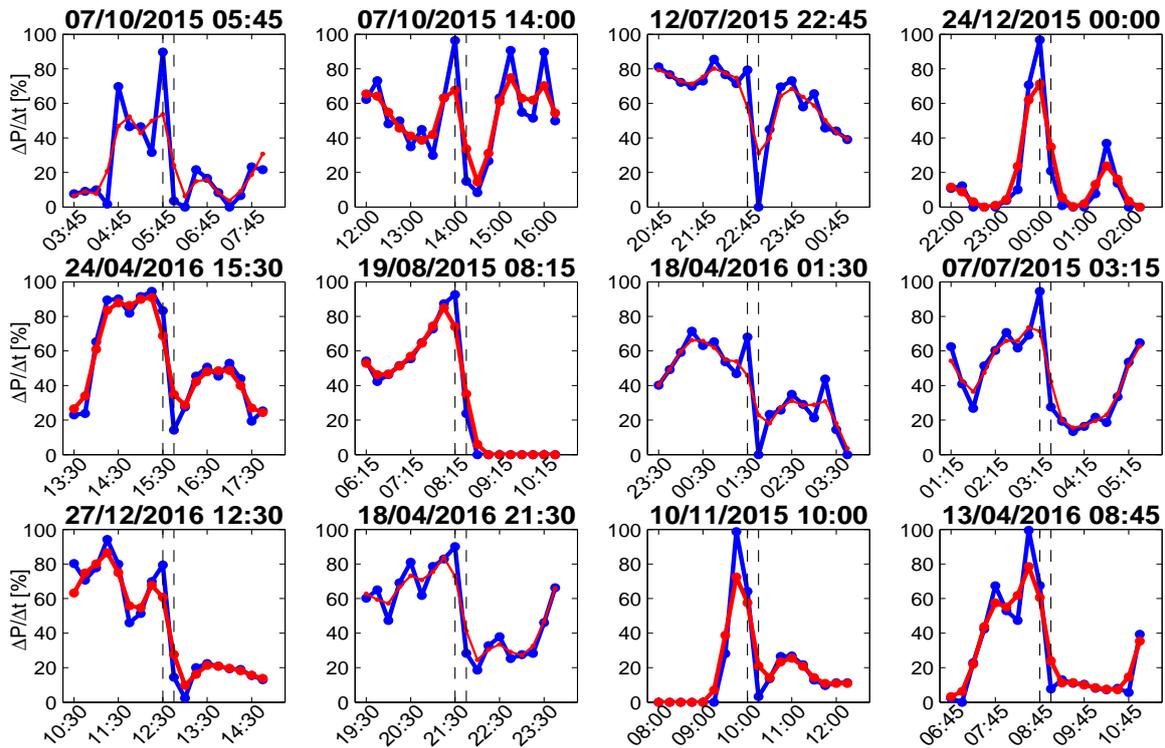


Figura A.1: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 1

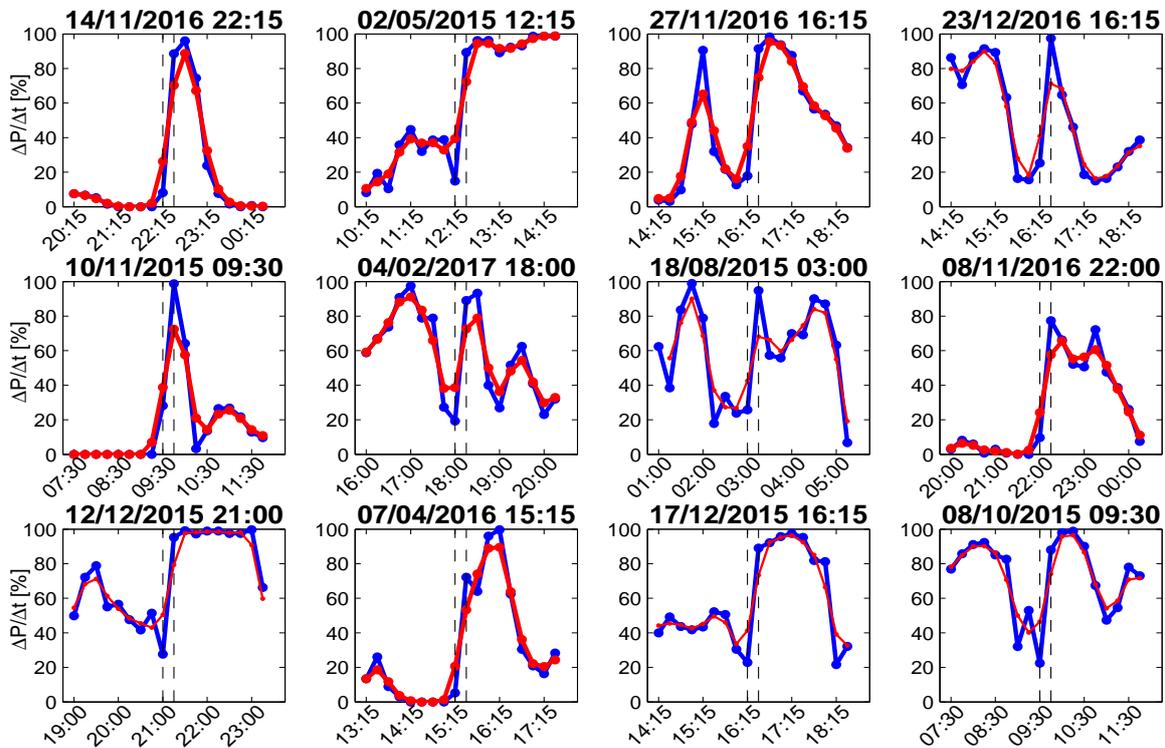


Figura A.2: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 1

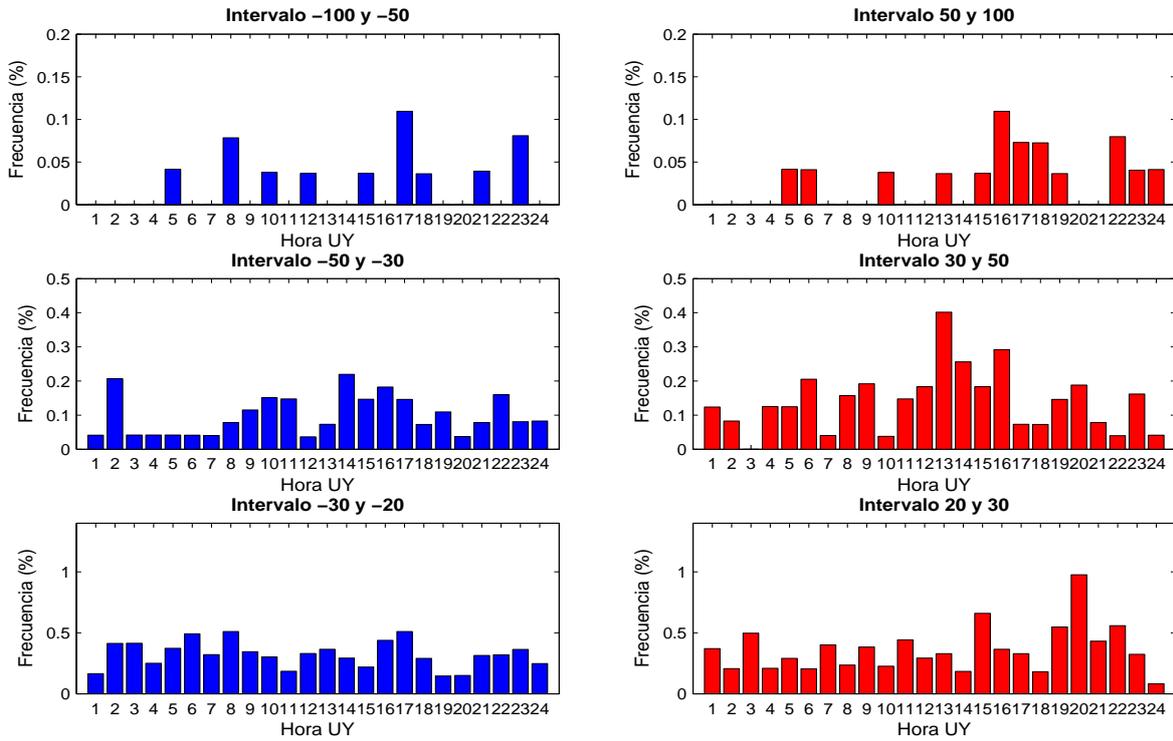


Figura A.3: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-UP. Eólico 2

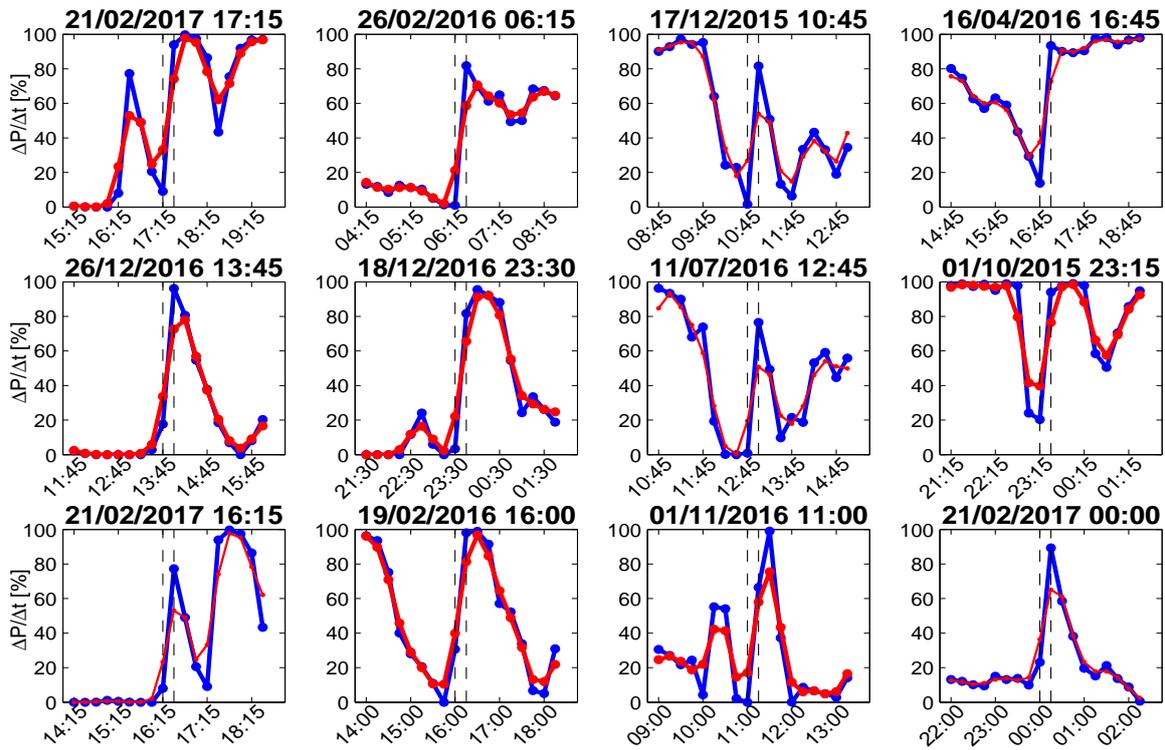


Figura A.4: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 2

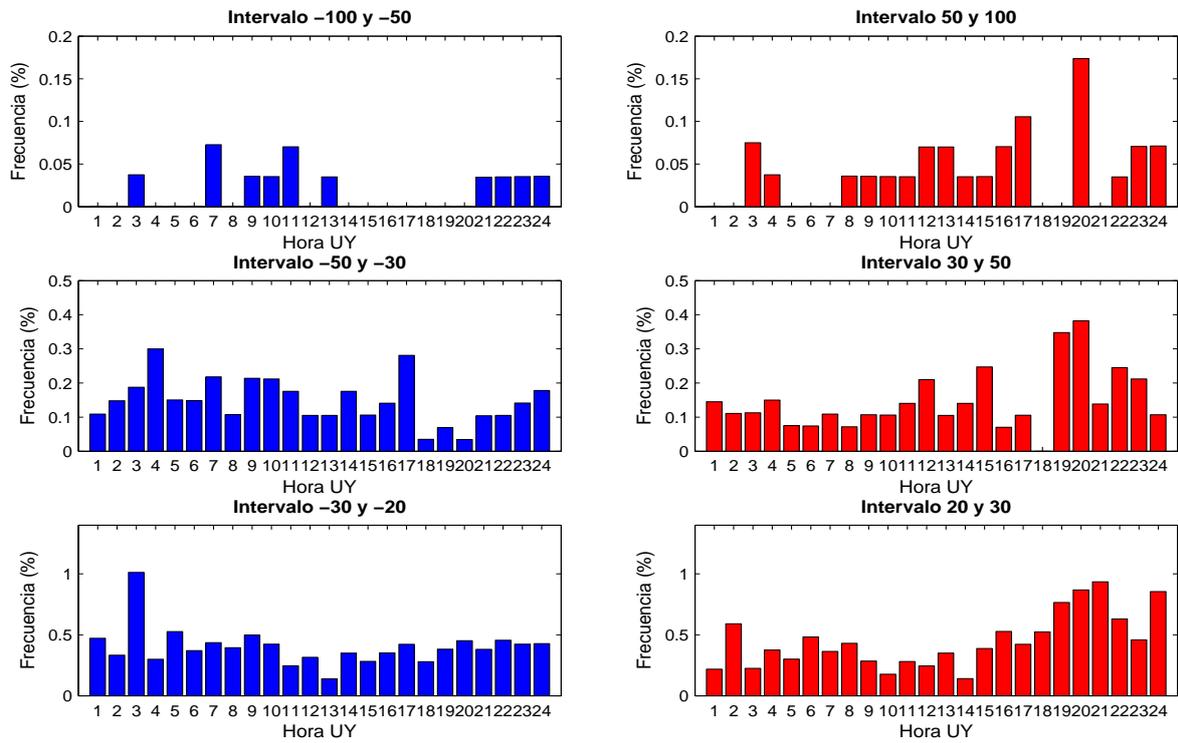


Figura A.5: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 3

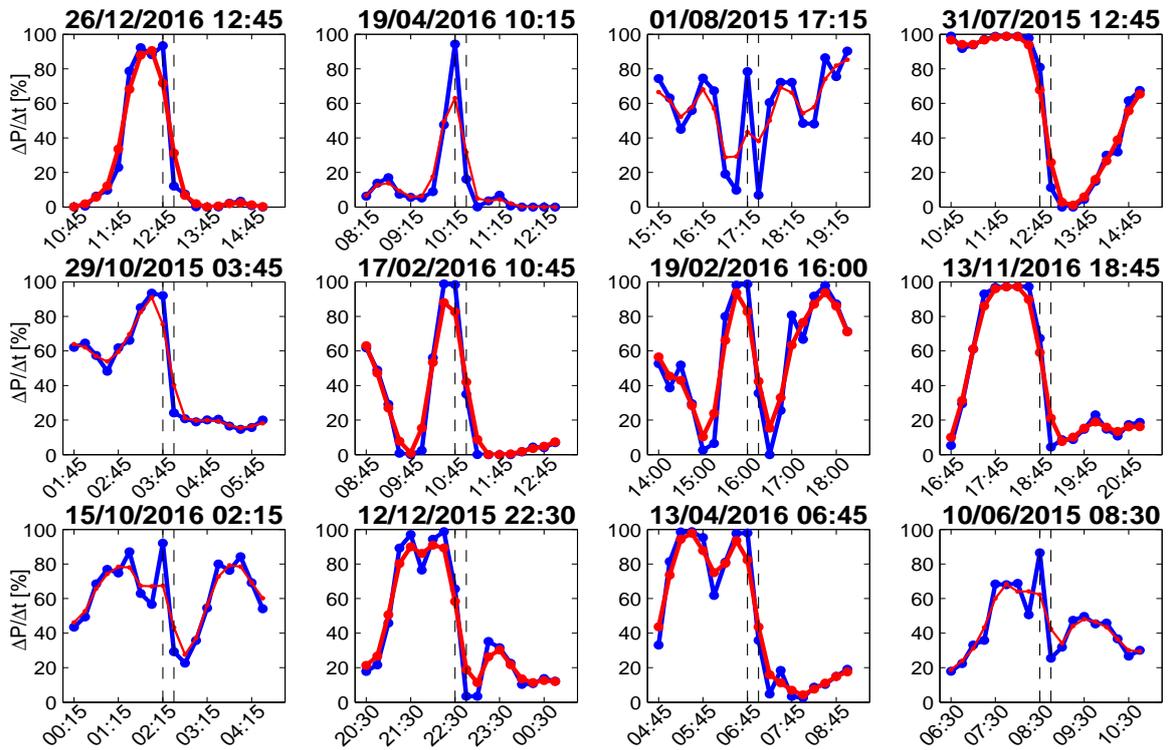


Figura A.6: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 3

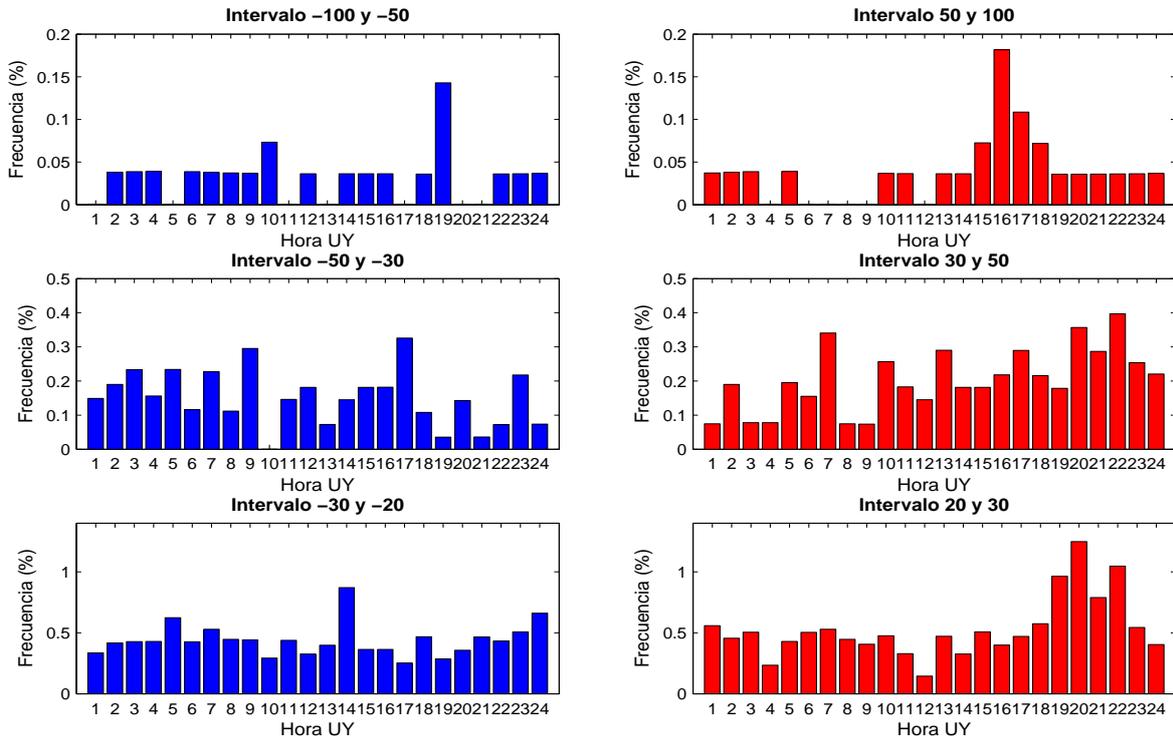


Figura A.7: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 4

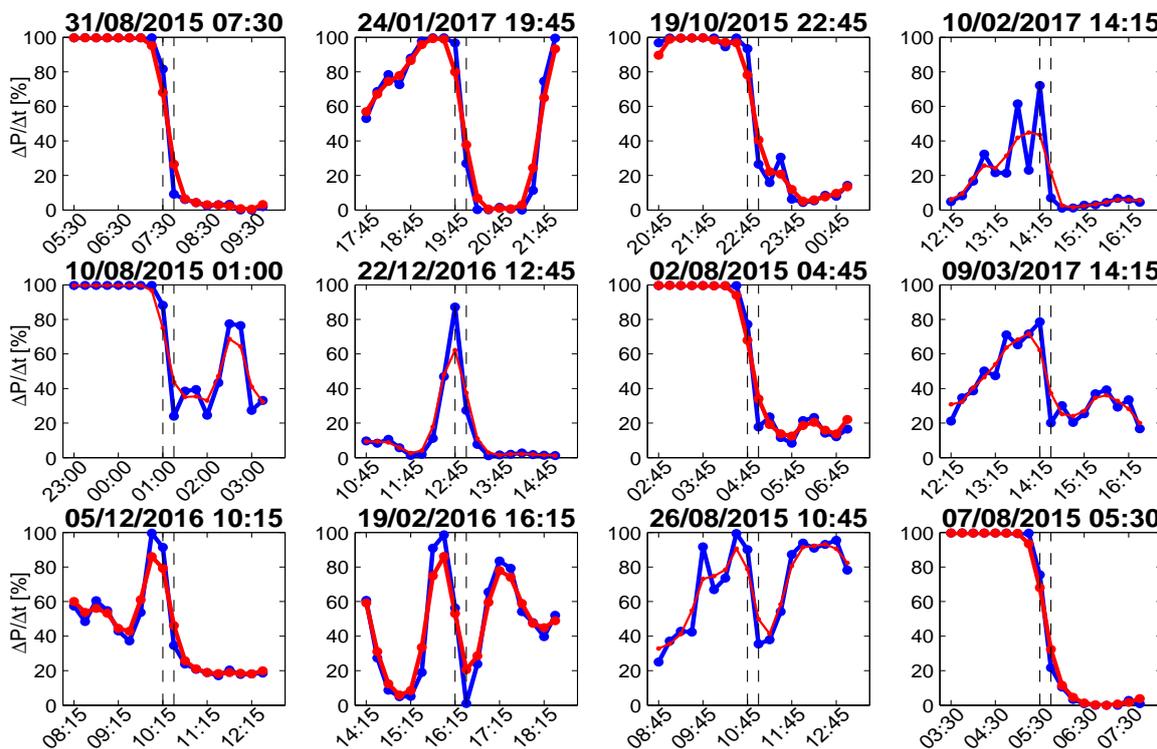


Figura A.8: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

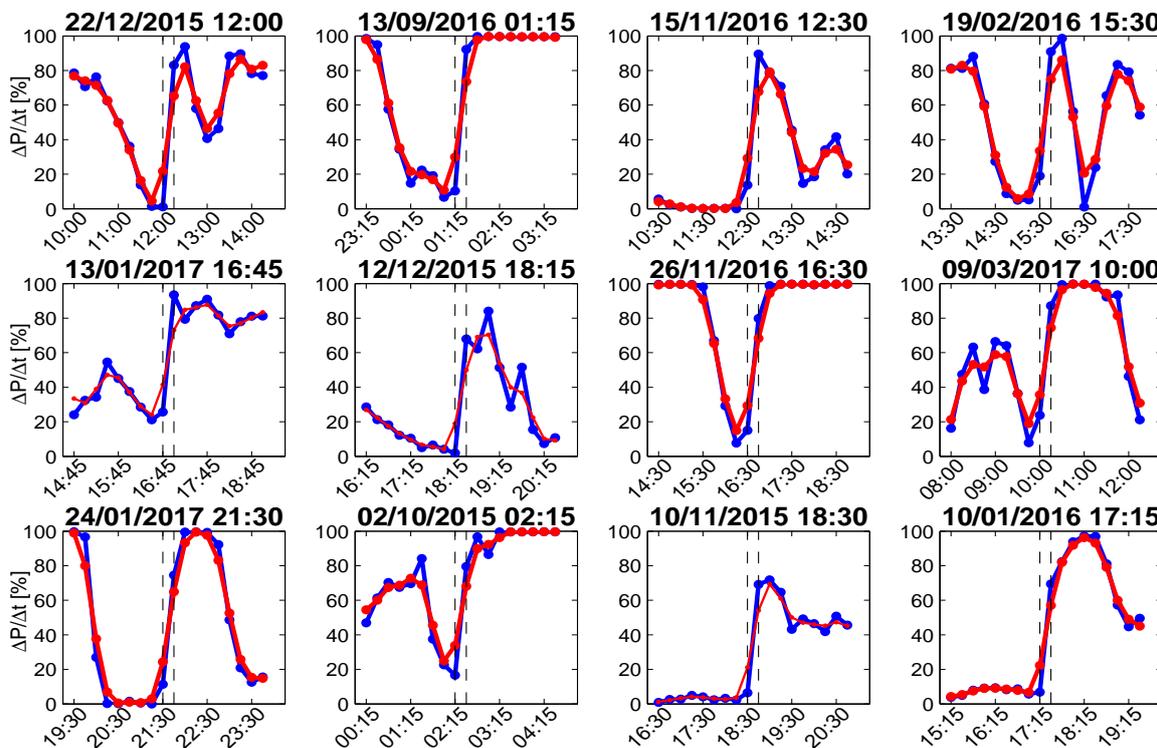


Figura A.9: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## RAMP-DOWN. Eólico 4

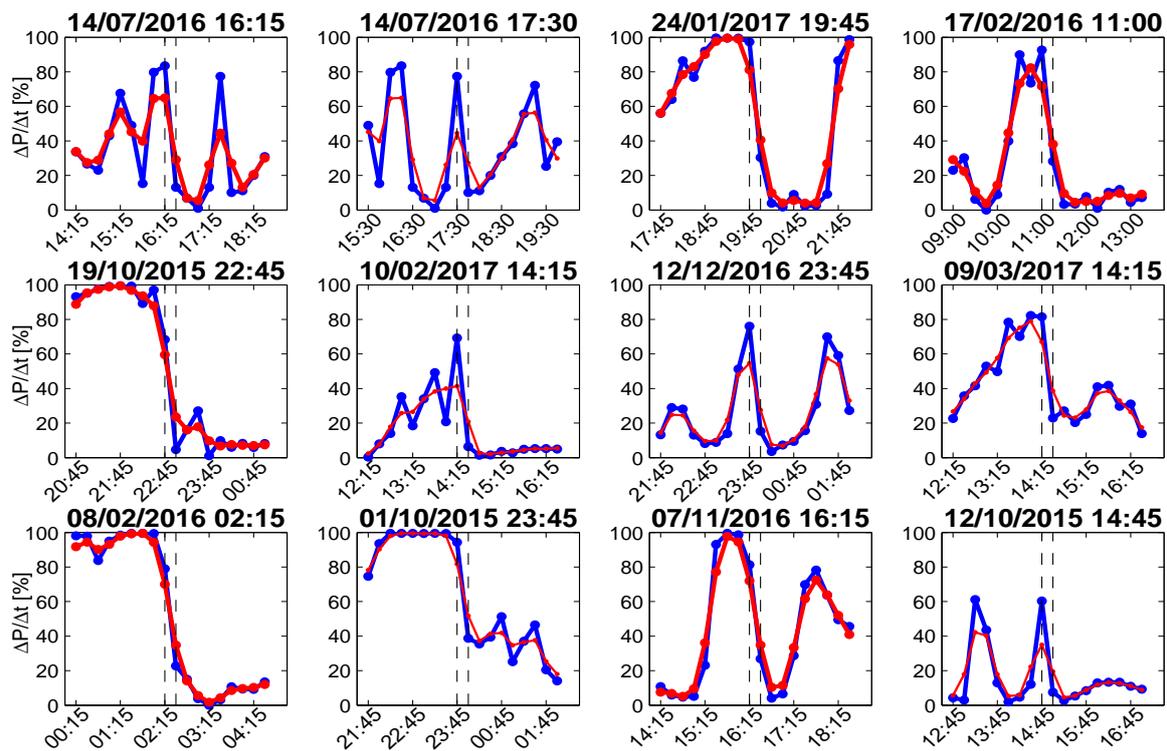


Figura A.10: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## RAMP-UP. Eólico 4

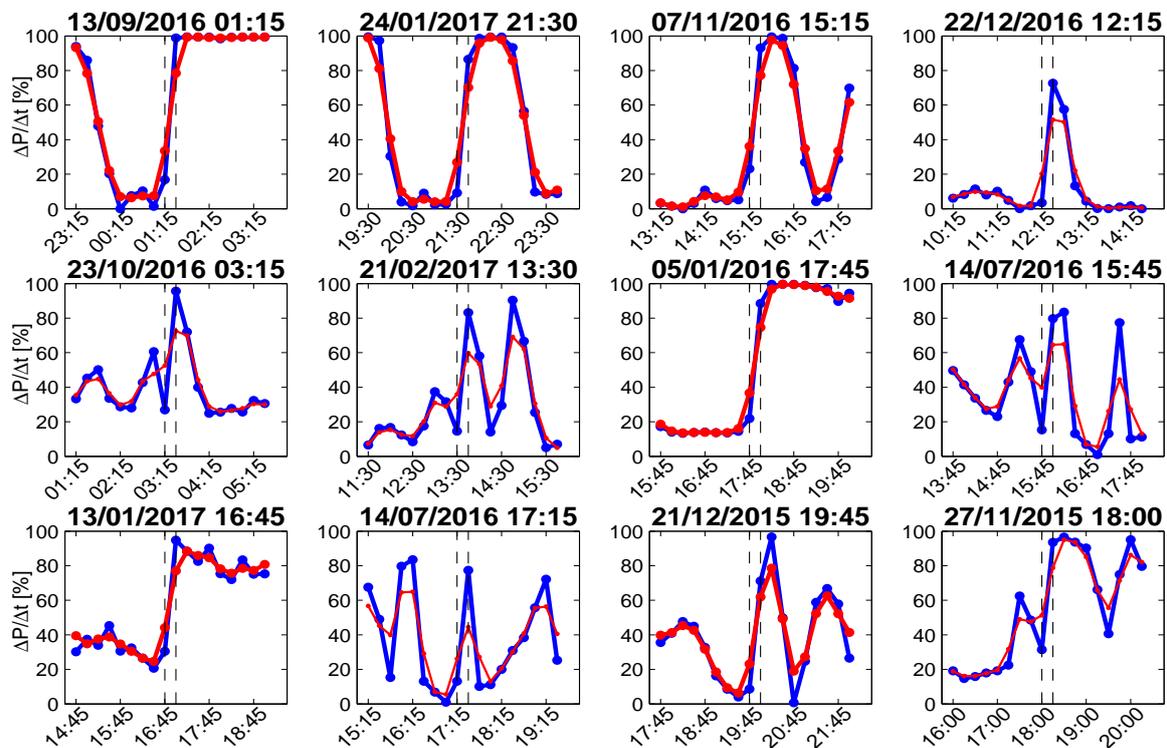


Figura A.11: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-DOWN. Eólico 4

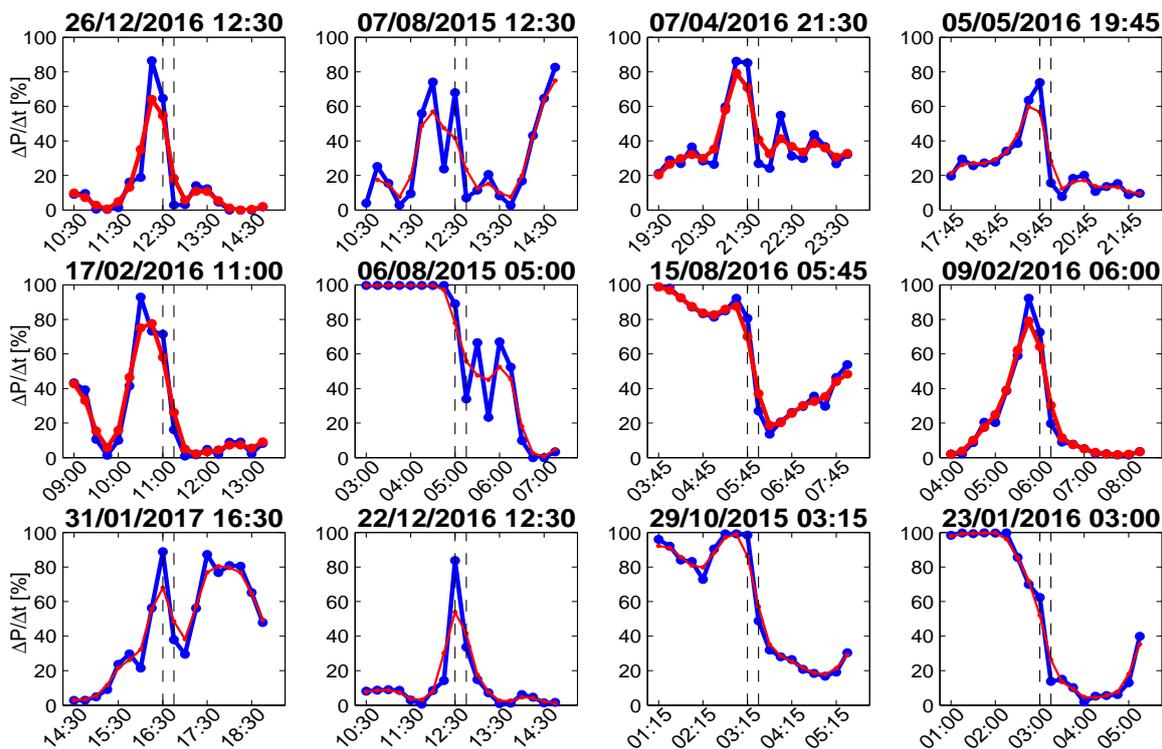


Figura A.12: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

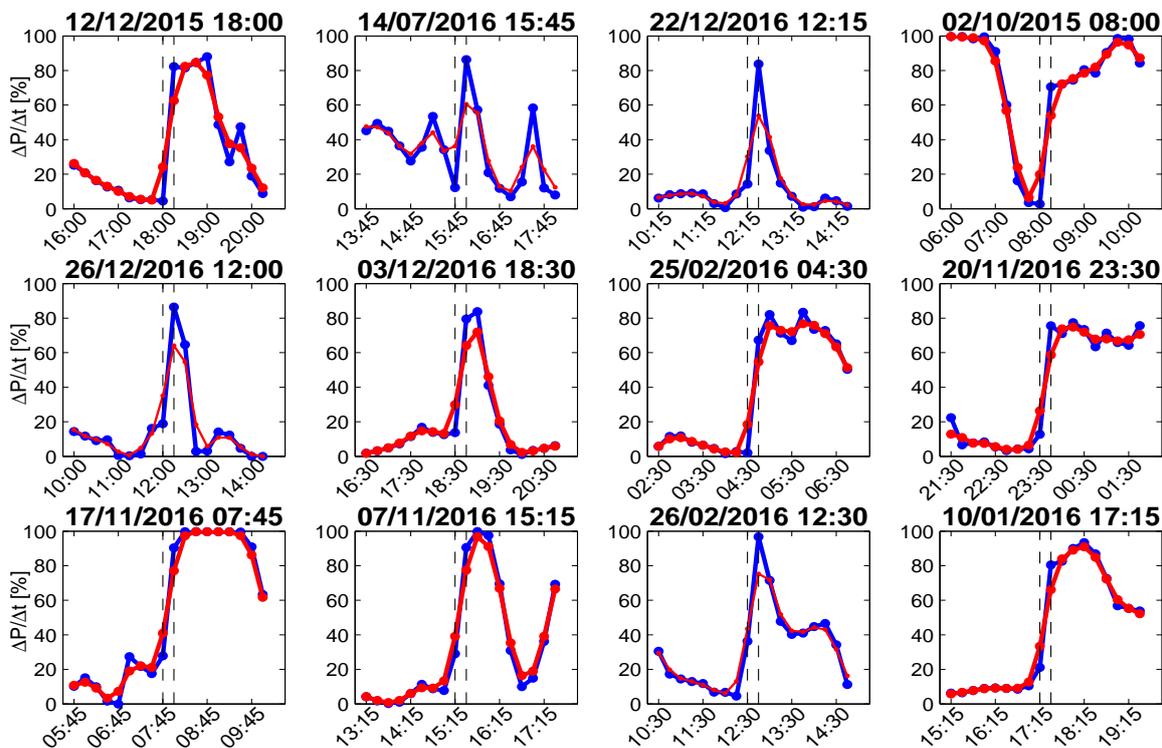


Figura A.13: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 4

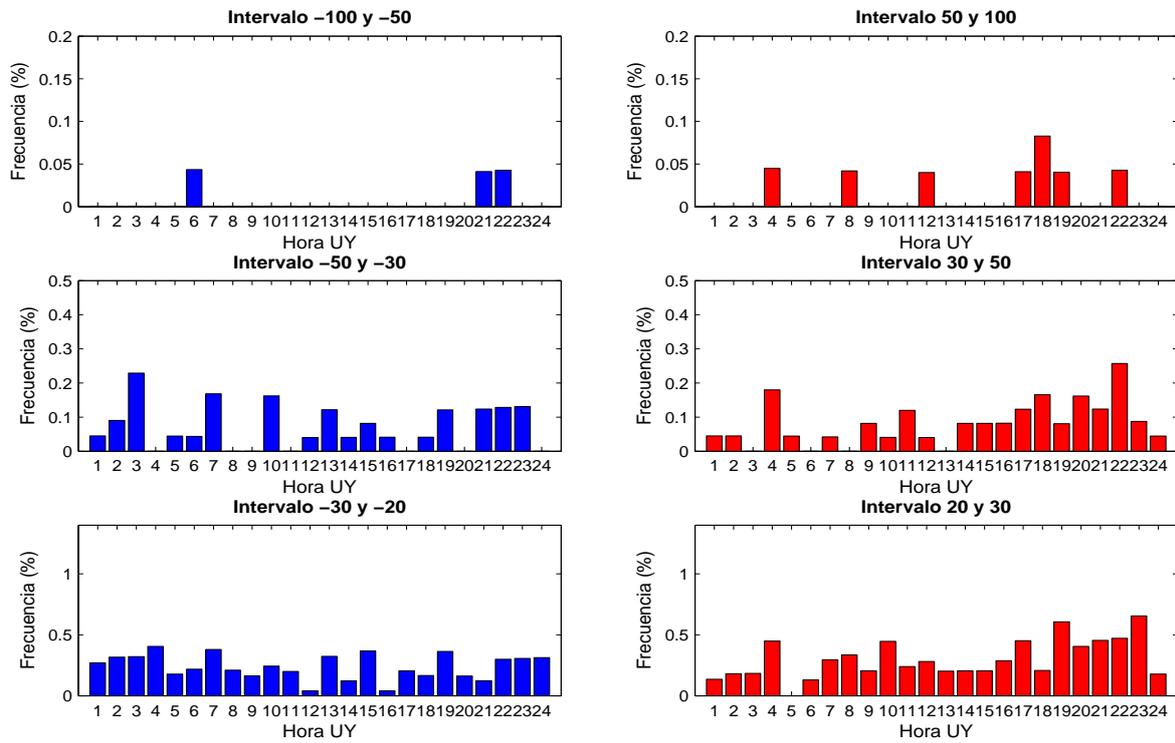


Figura A.14: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 6

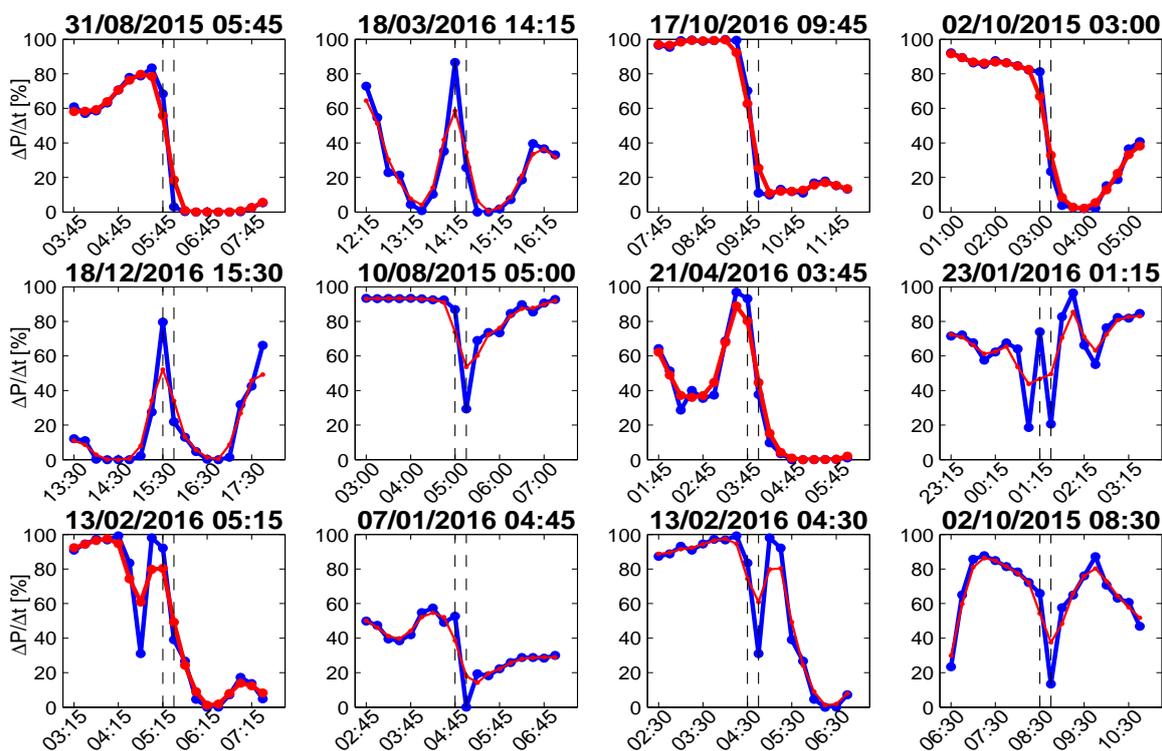


Figura A.15: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 6

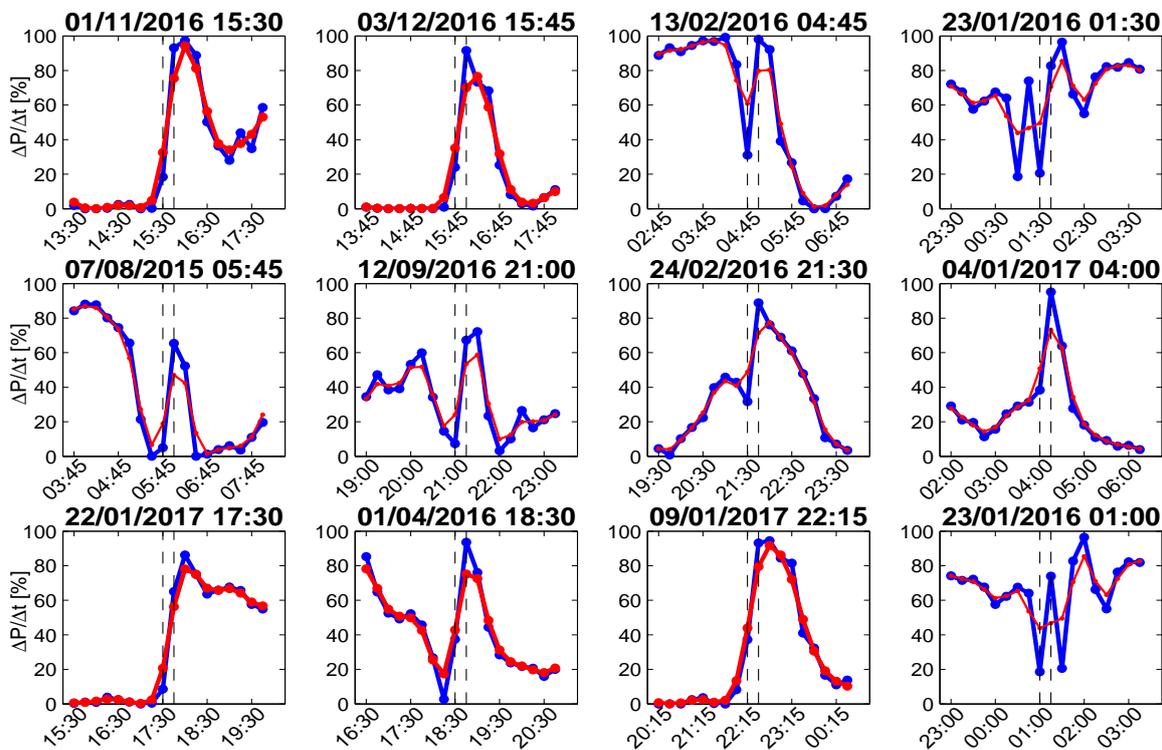


Figura A.16: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 6

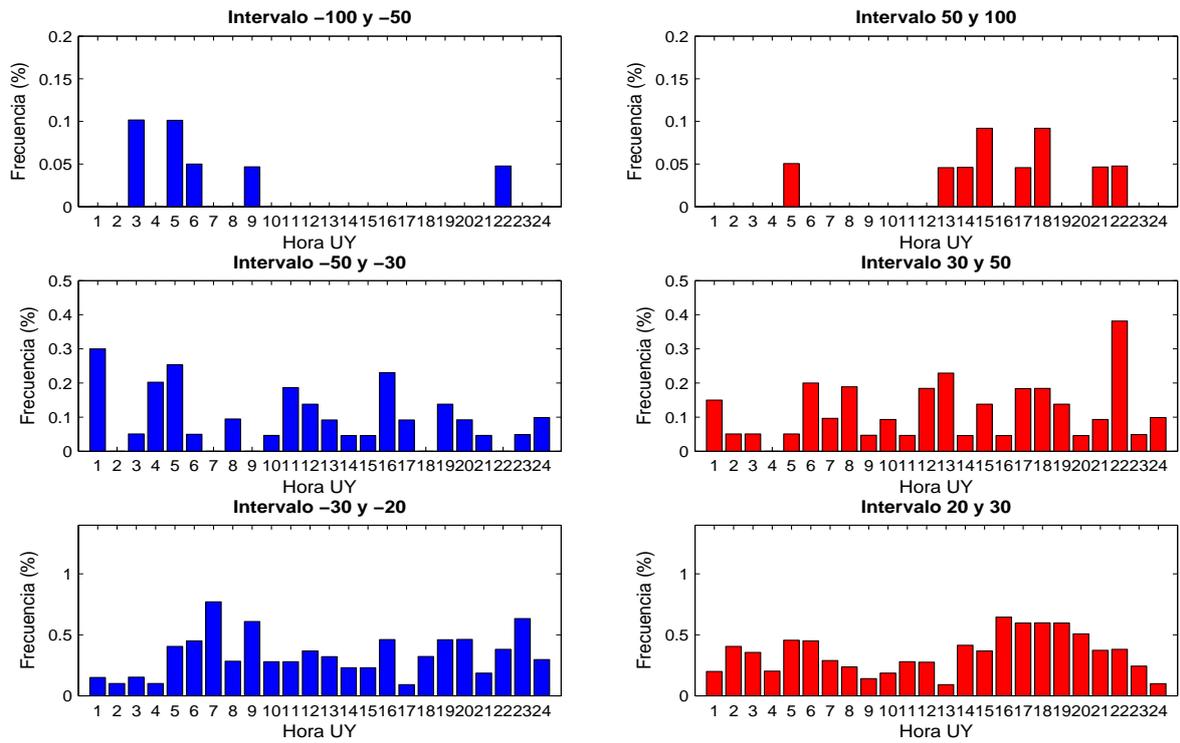


Figura A.17: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 5

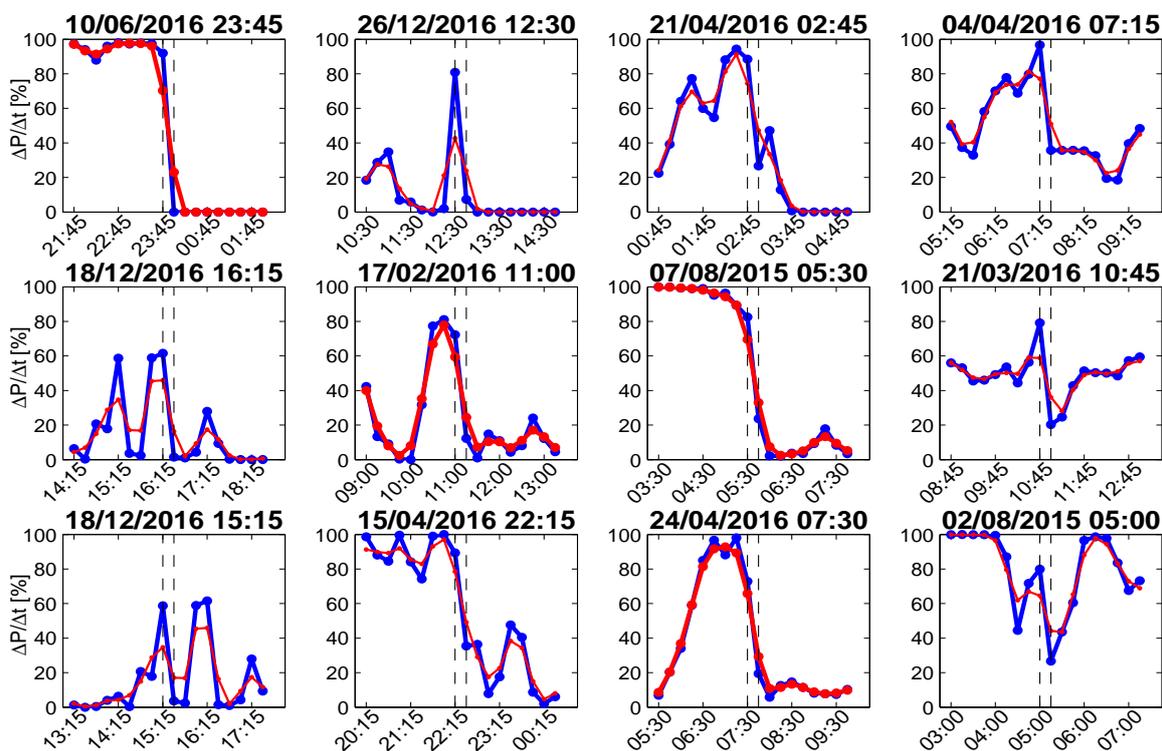


Figura A.18: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 5

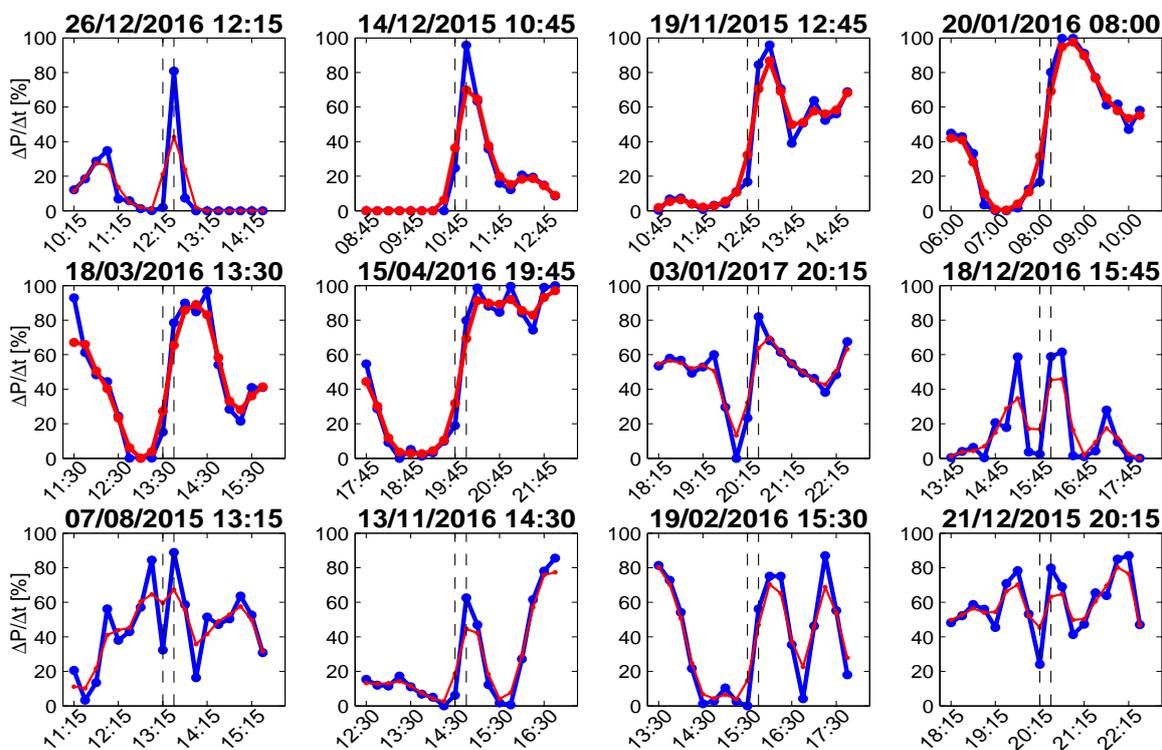


Figura A.19: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 15' por intervalo. Parque 5

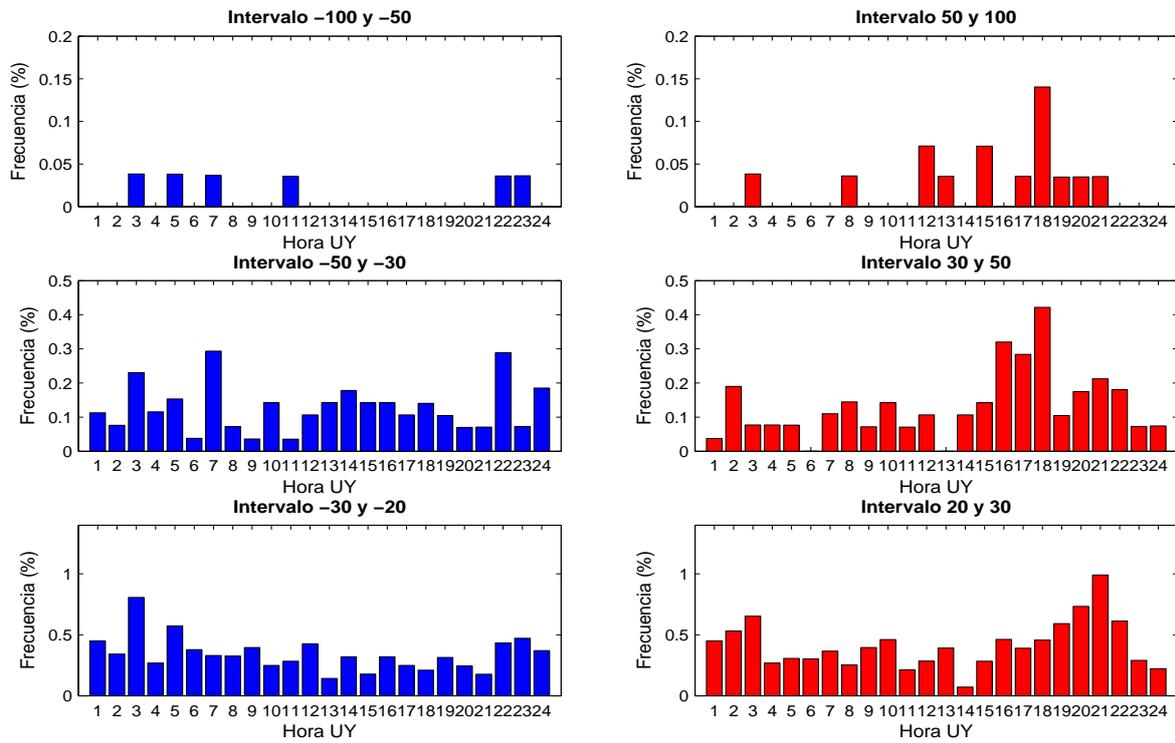


Figura A.20: Ciclo diario de rampas de 15' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 7

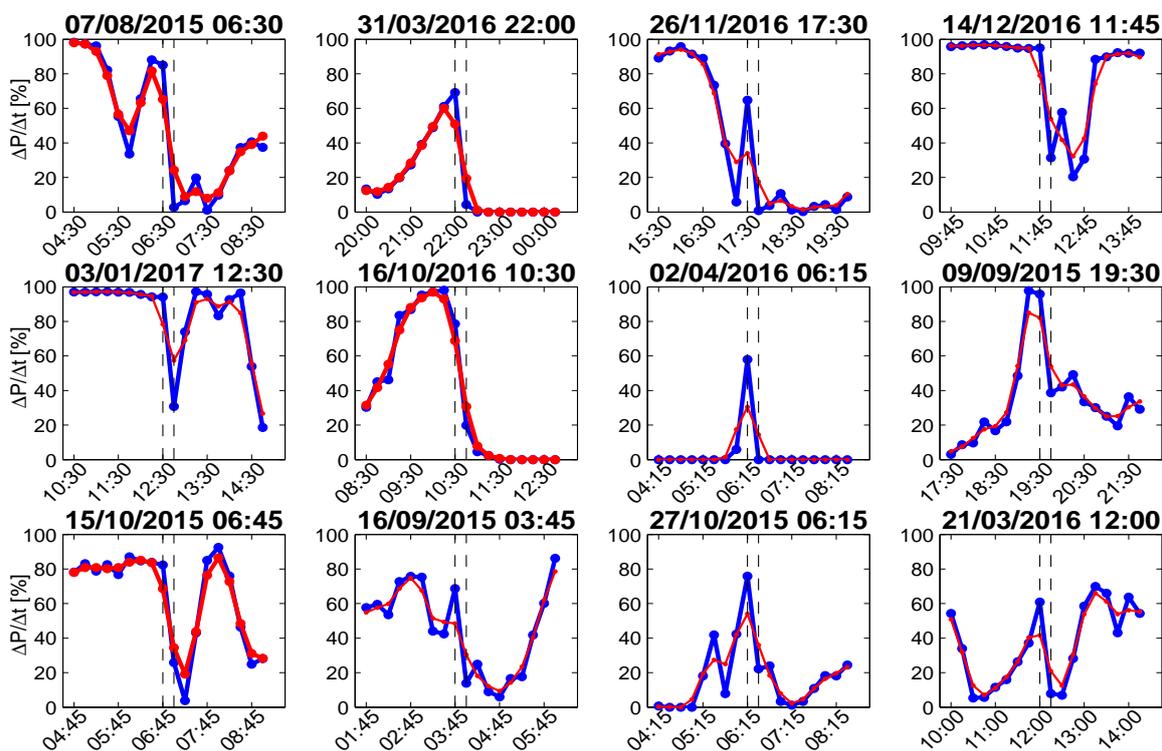


Figura A.21: Rampas 15' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 7

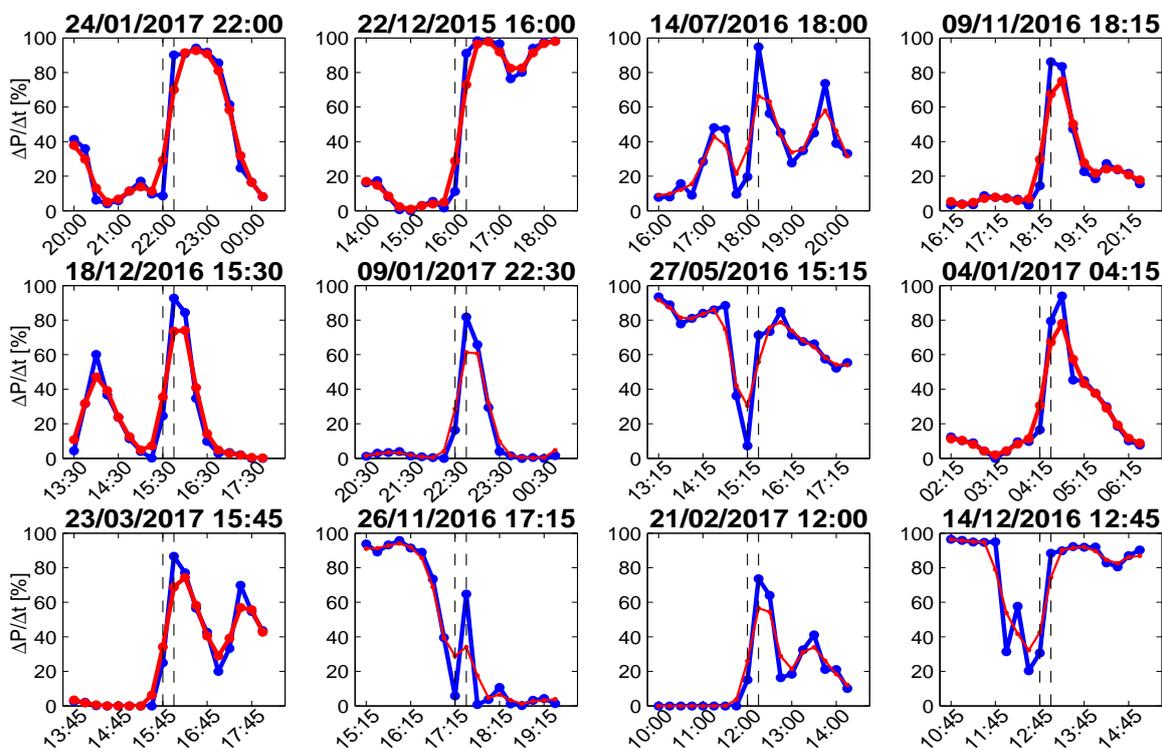


Figura A.22: Rampas 15' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## Anexo B

### Resultados rampas 30'

RAMP-DOWN. Eólico 1

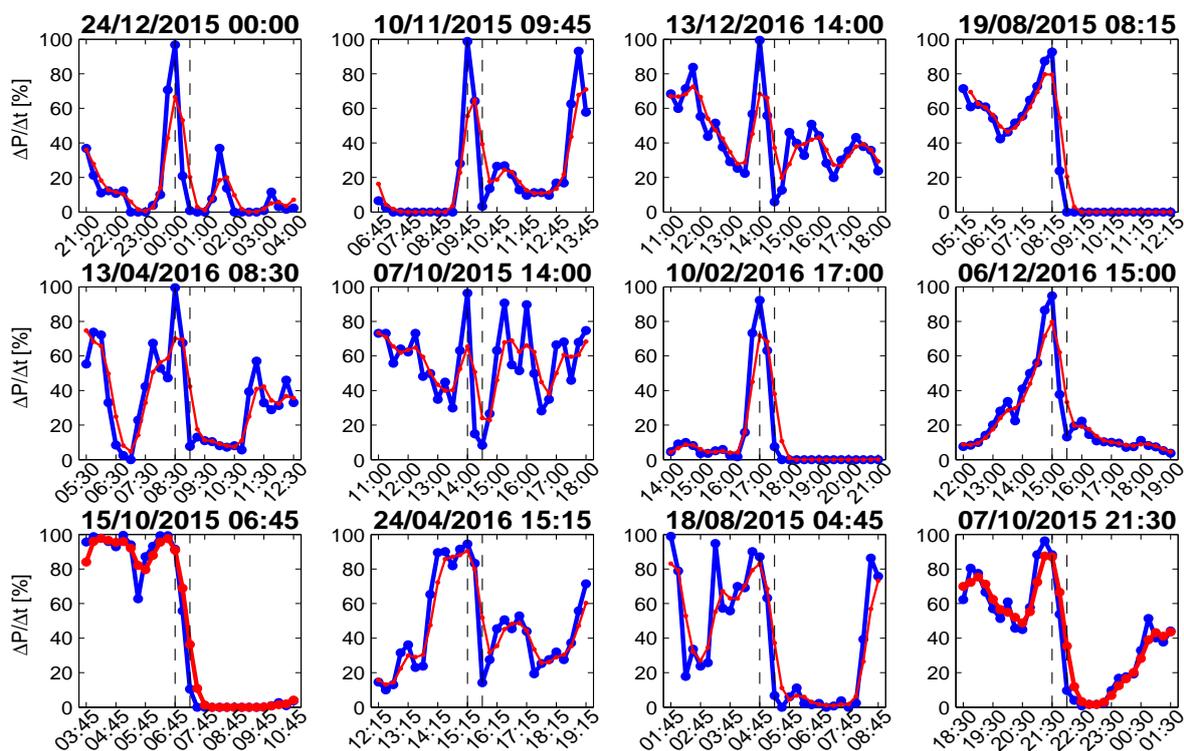


Figura B.1: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 1

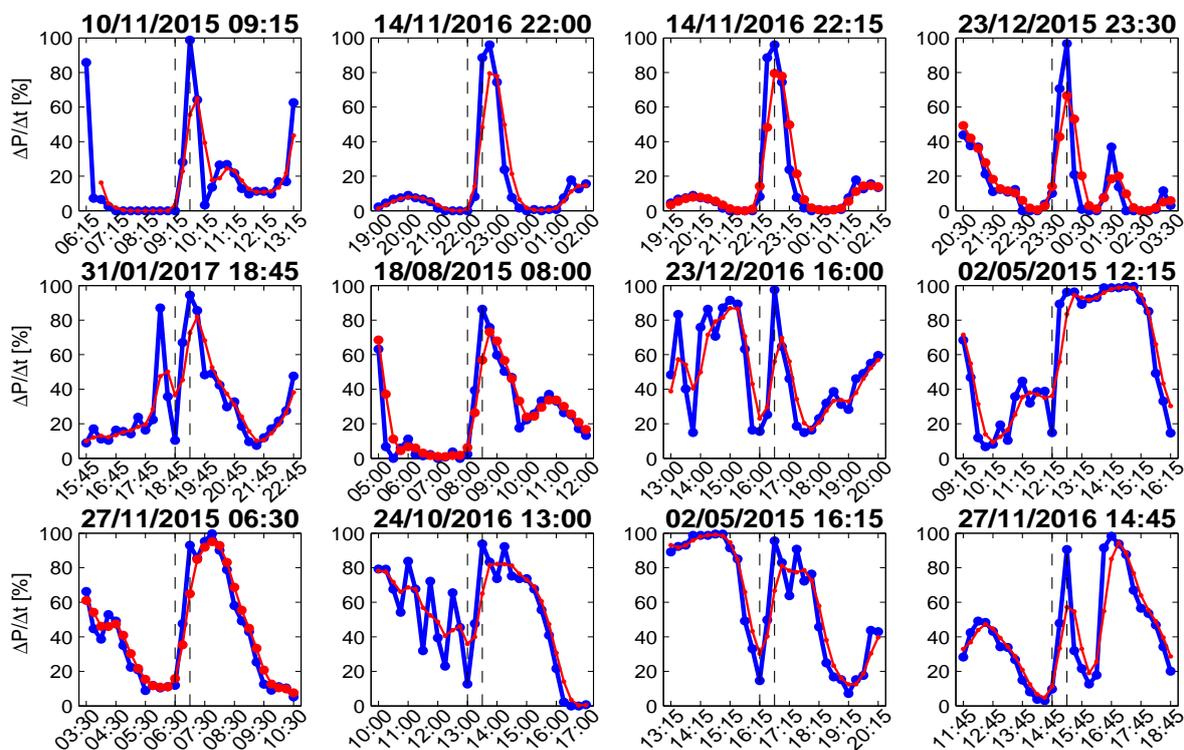


Figura B.2: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo. Parque 1

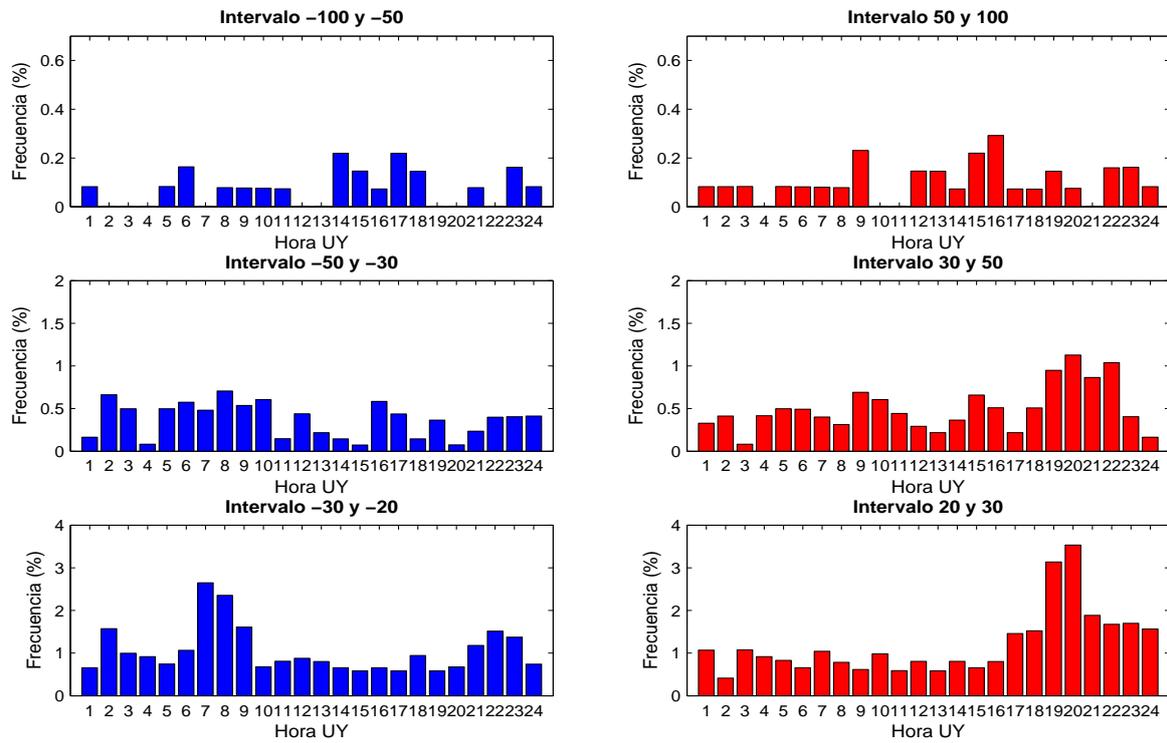


Figura B.3: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 2

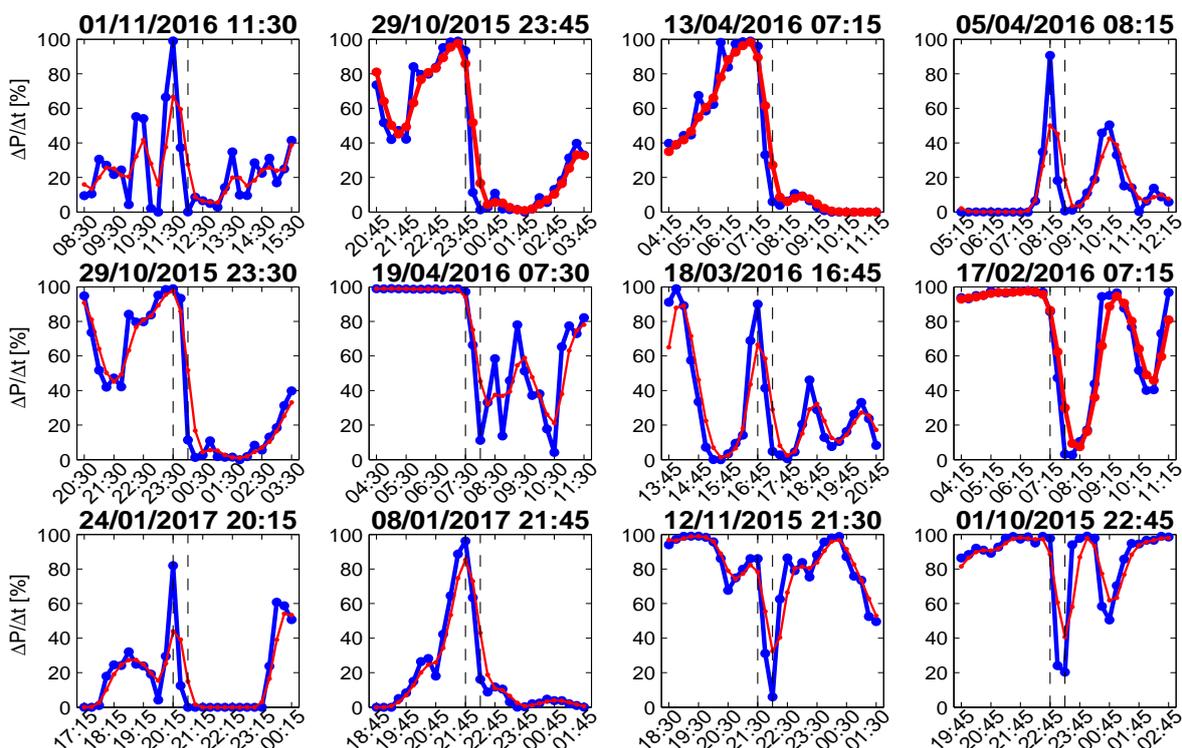


Figura B.4: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 2

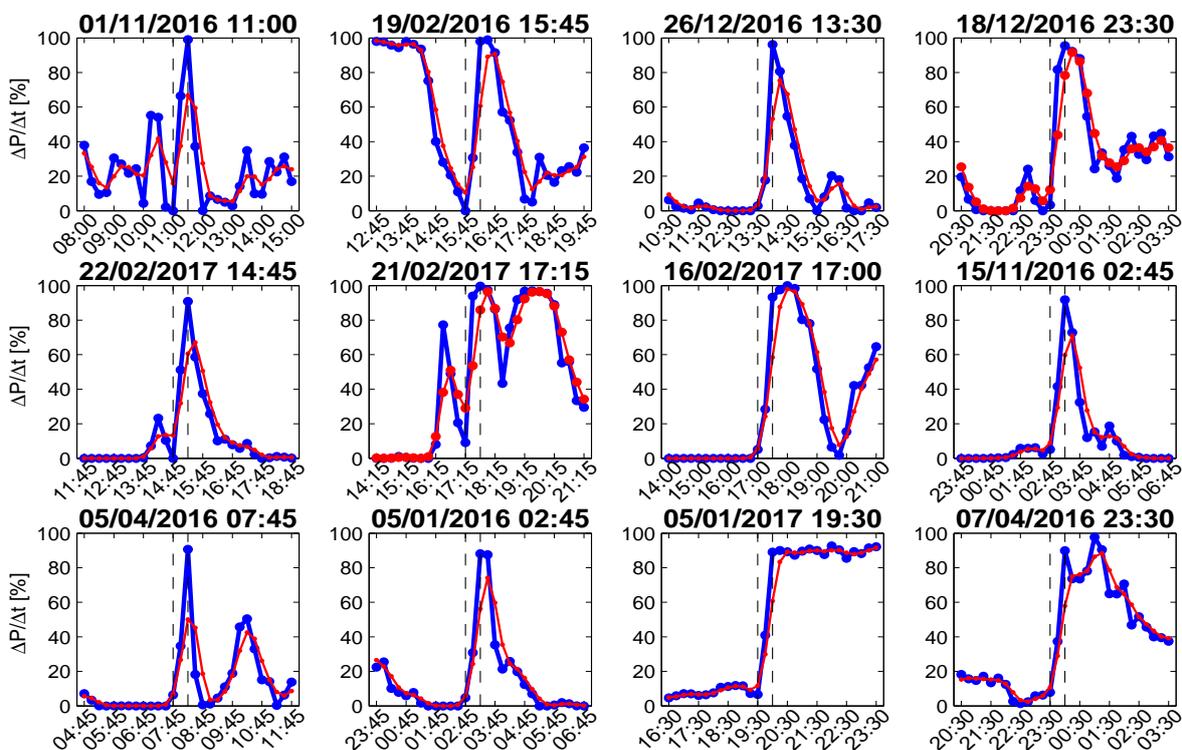


Figura B.5: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo. Parque 2

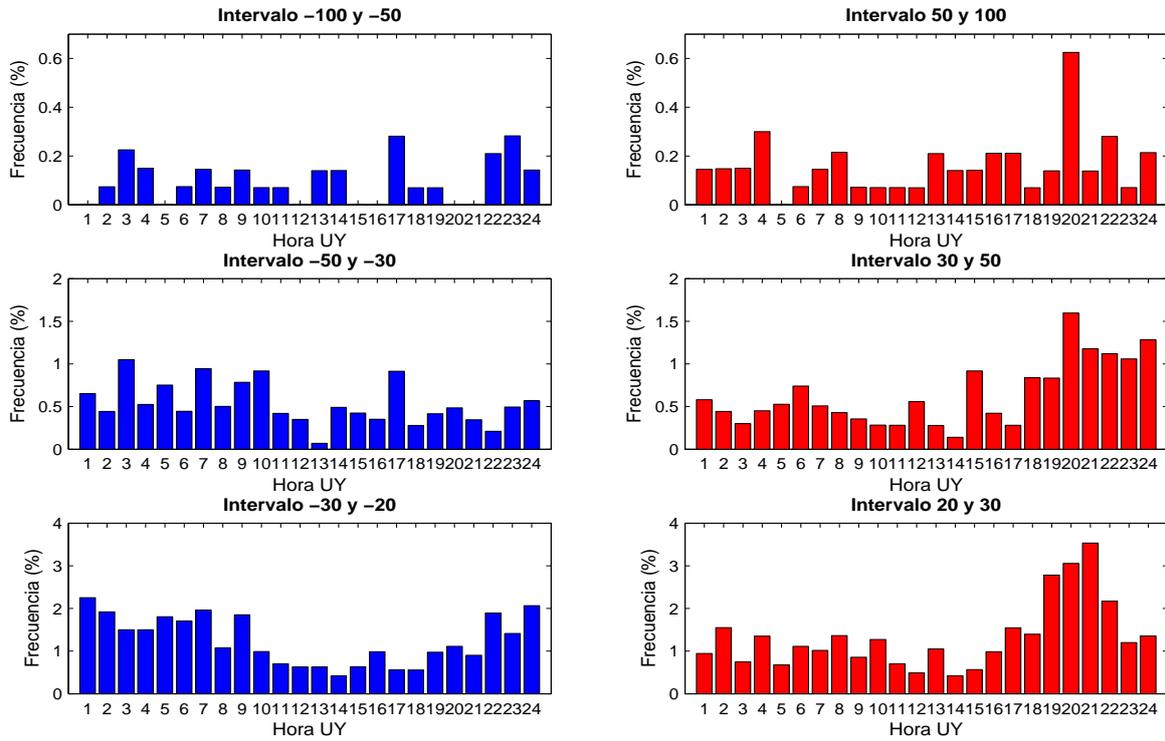


Figura B.6: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-UP. Eólico 3

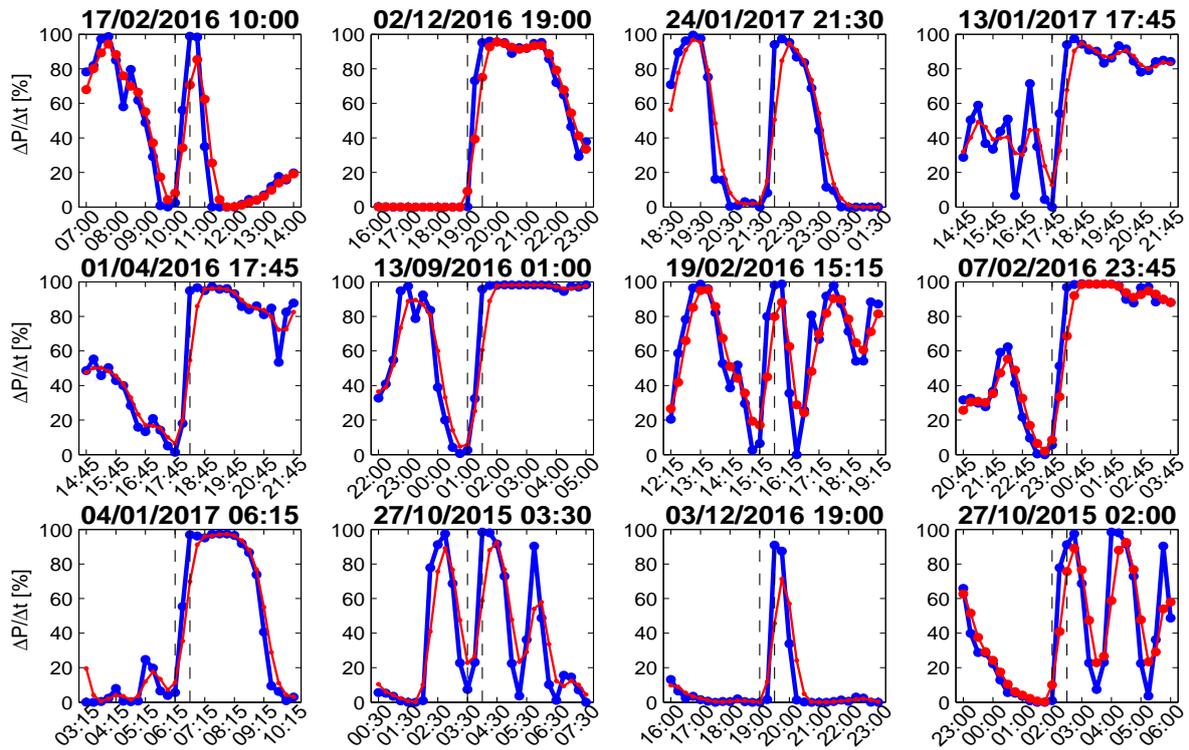


Figura B.7: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-DOWN. Eólico 4

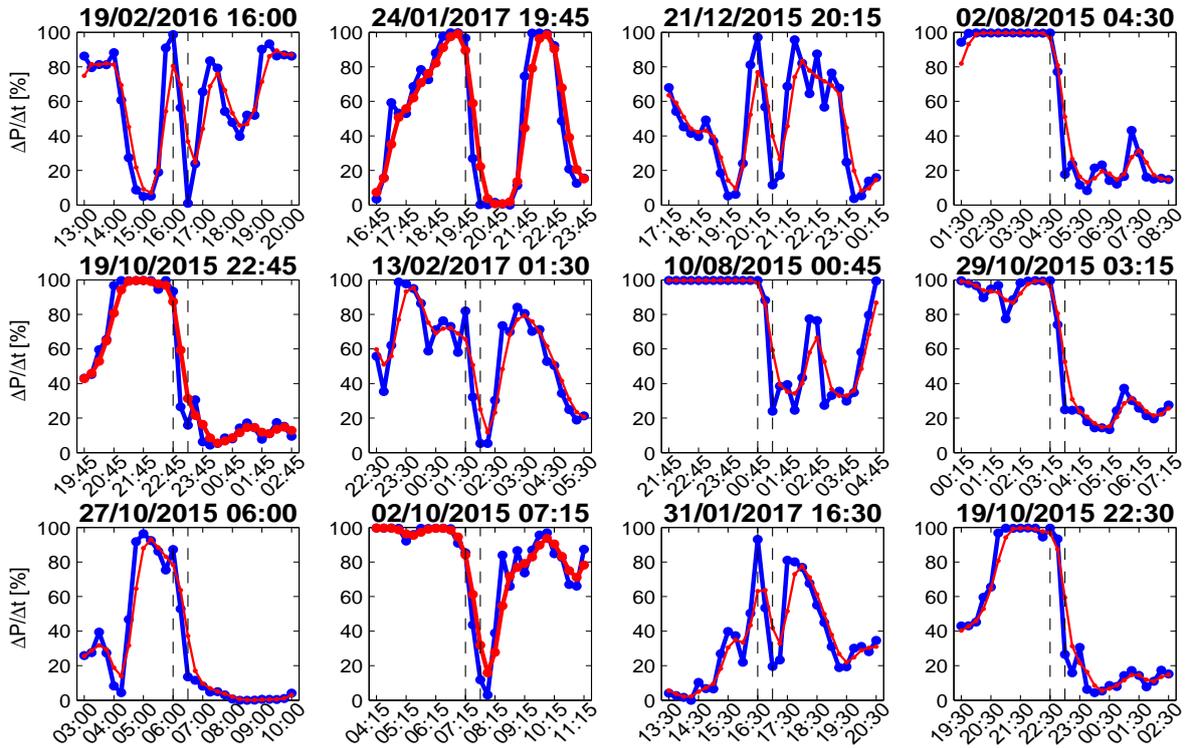


Figura B.8: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

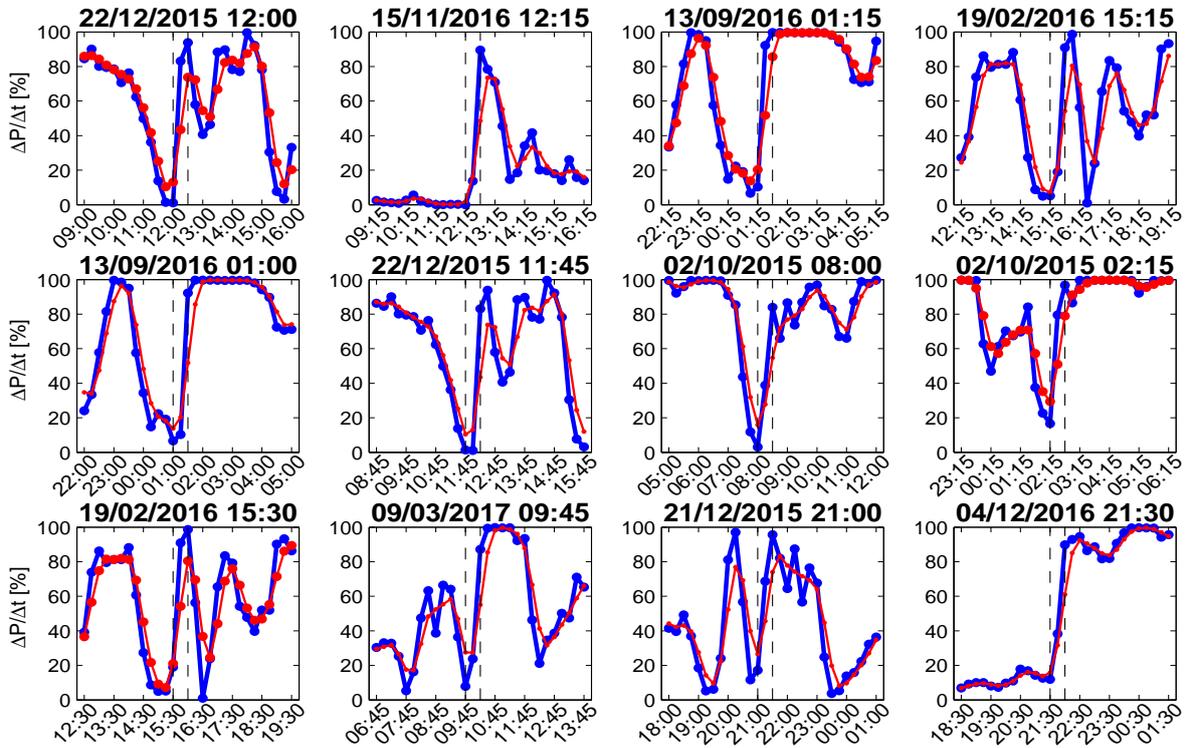


Figura B.9: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-DOWN. Eólico 4

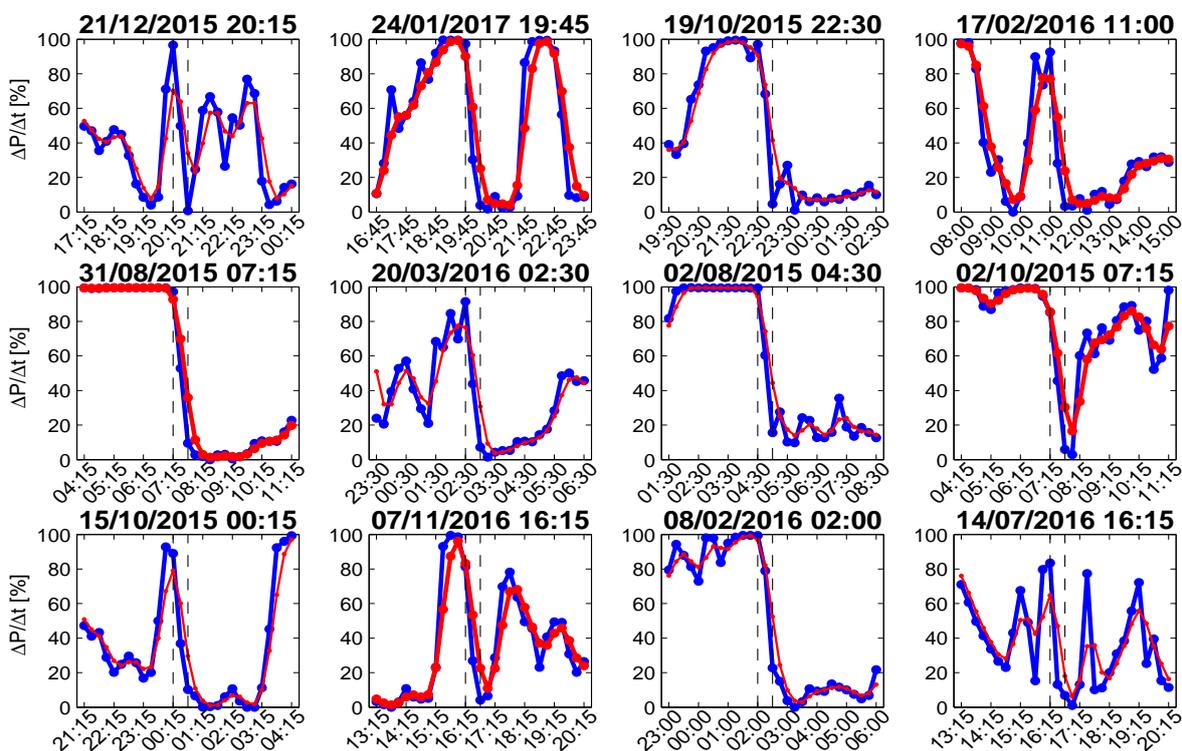


Figura B.10: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

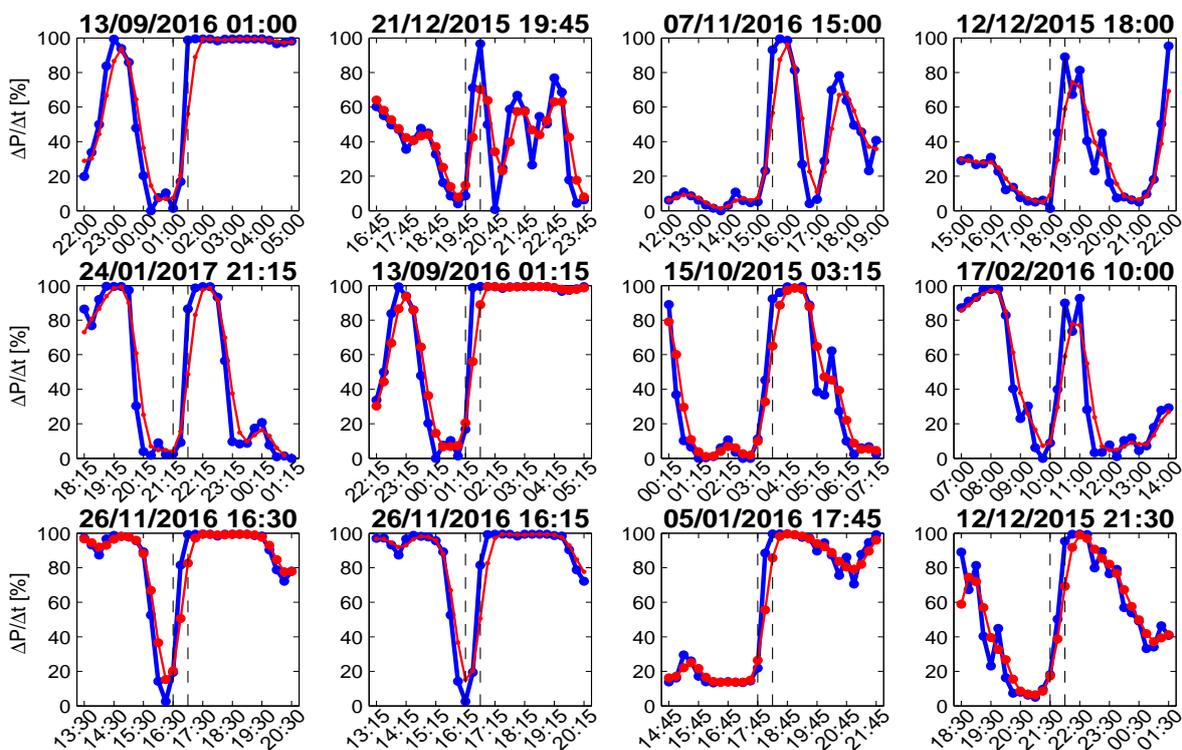


Figura B.11: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## RAMP-DOWN. Eólico 4

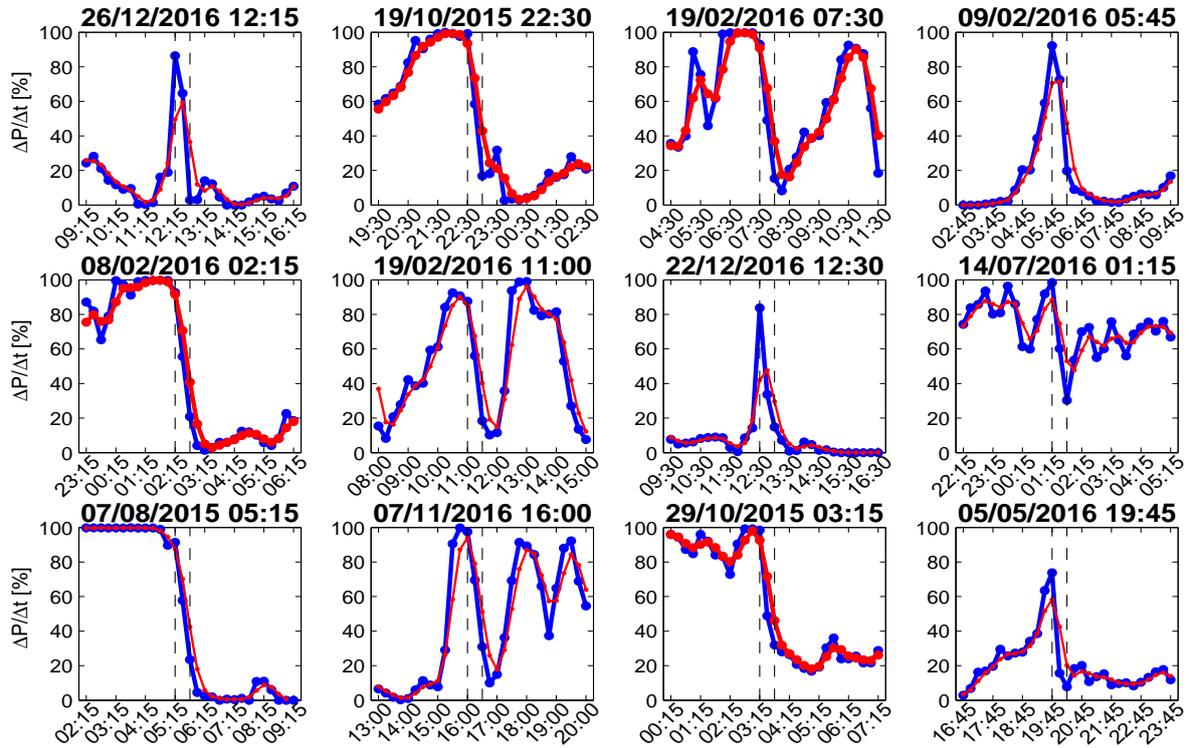


Figura B.12: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## RAMP-UP. Eólico 4

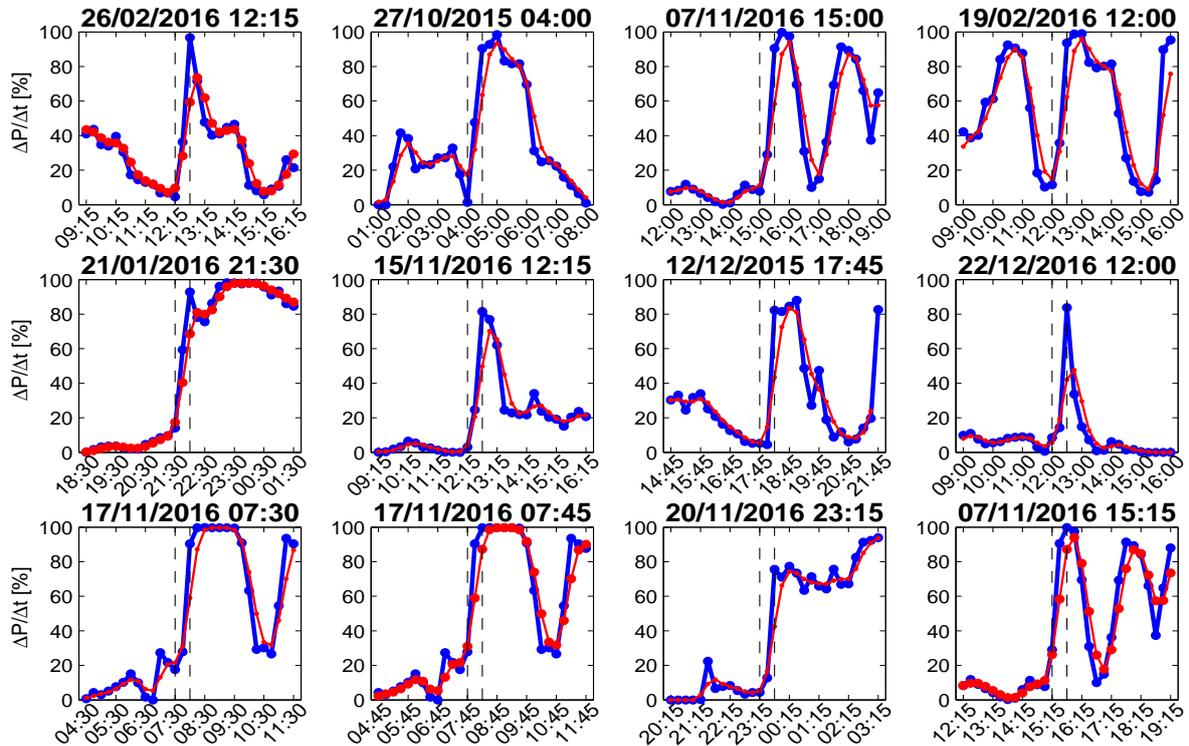


Figura B.13: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo. Parque 4

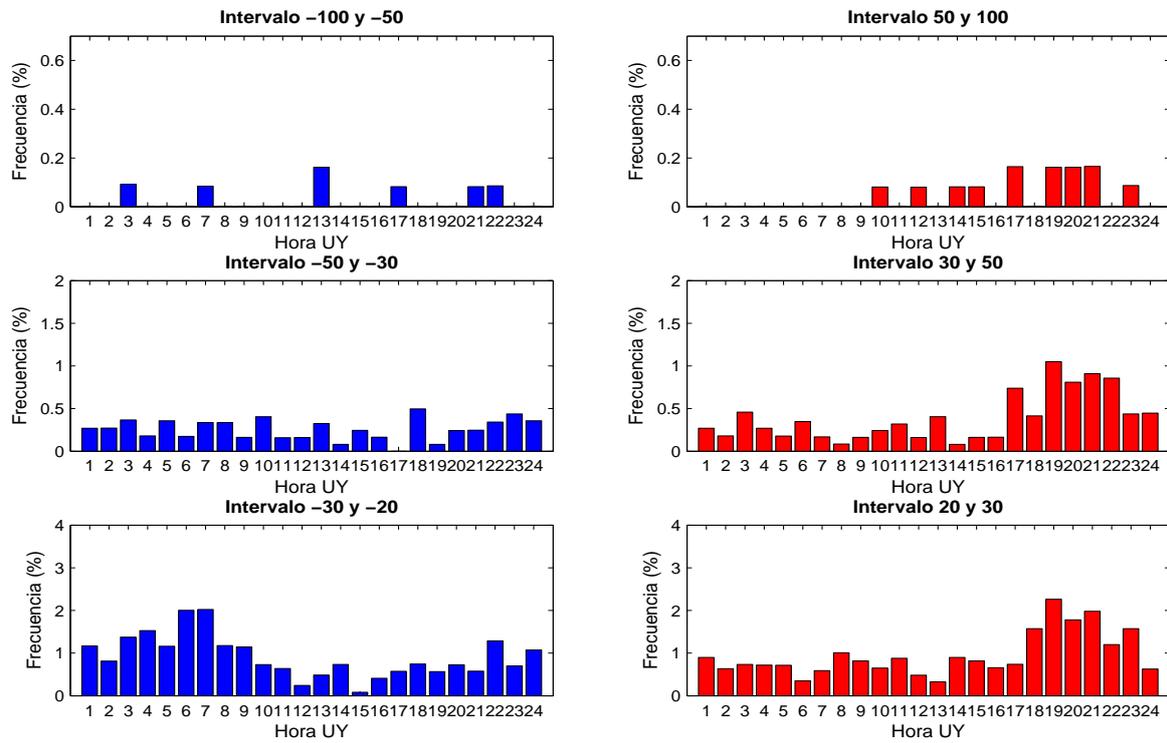


Figura B.14: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 6

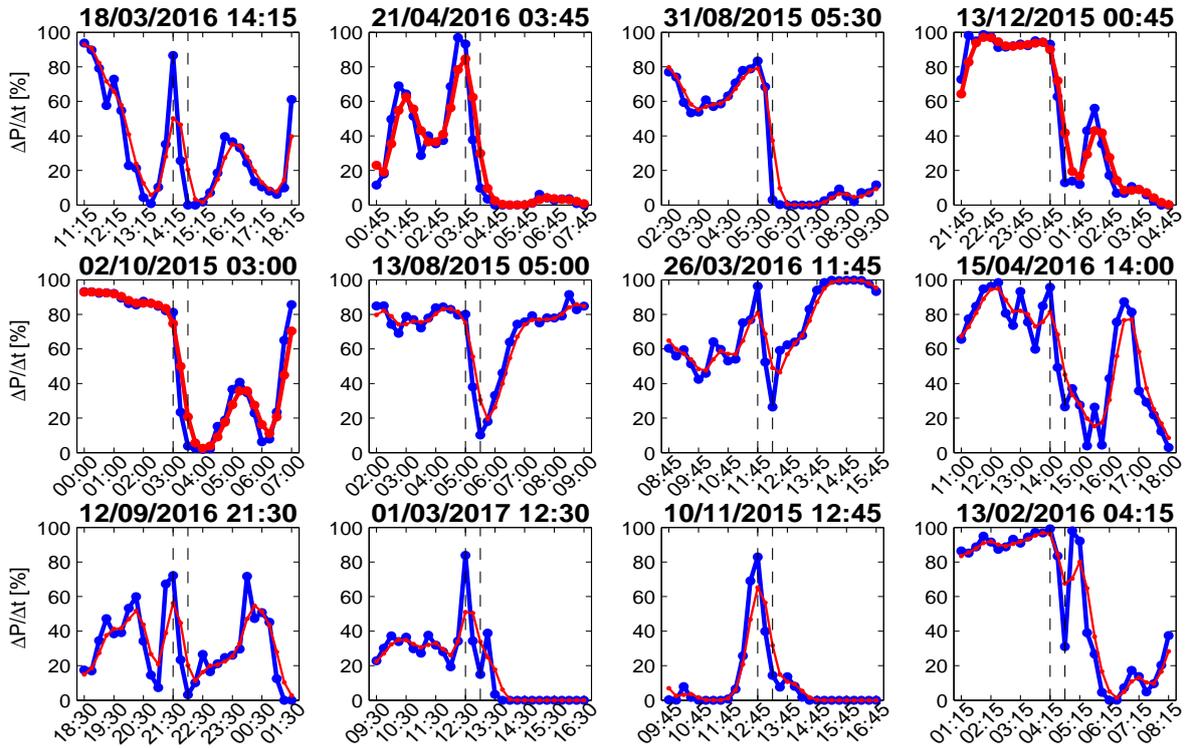


Figura B.15: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 6

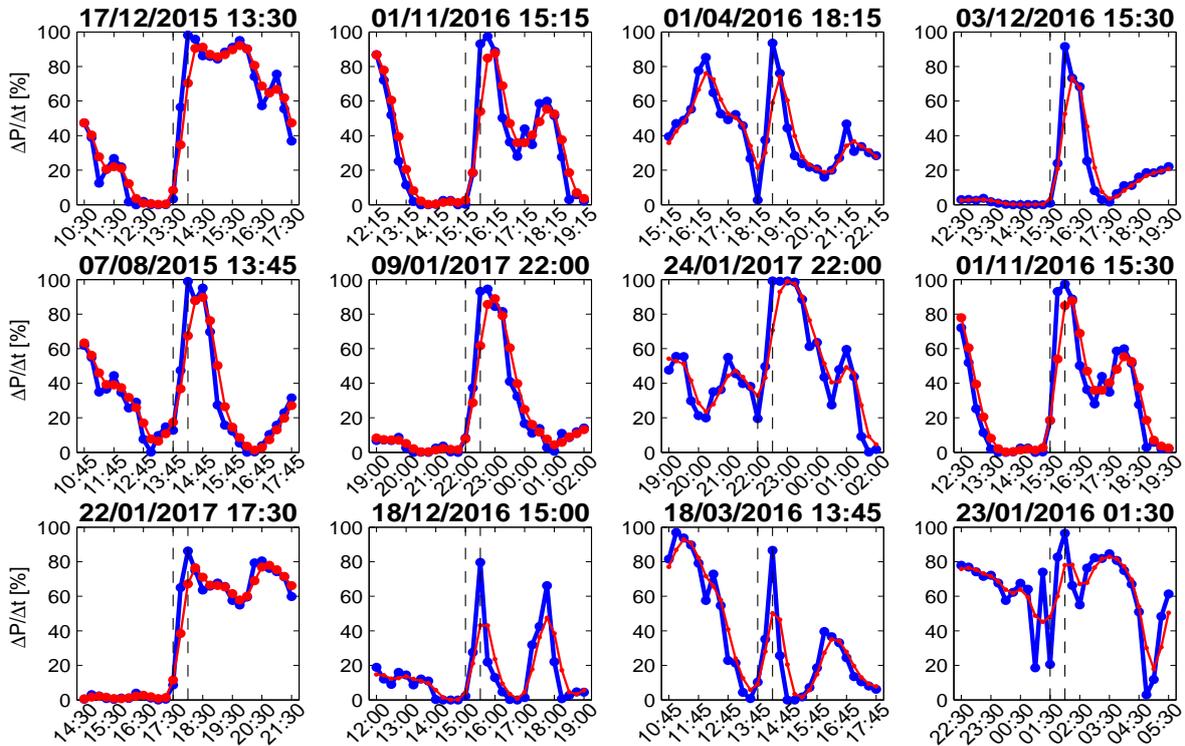


Figura B.16: Rampas 30' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo. Parque 6

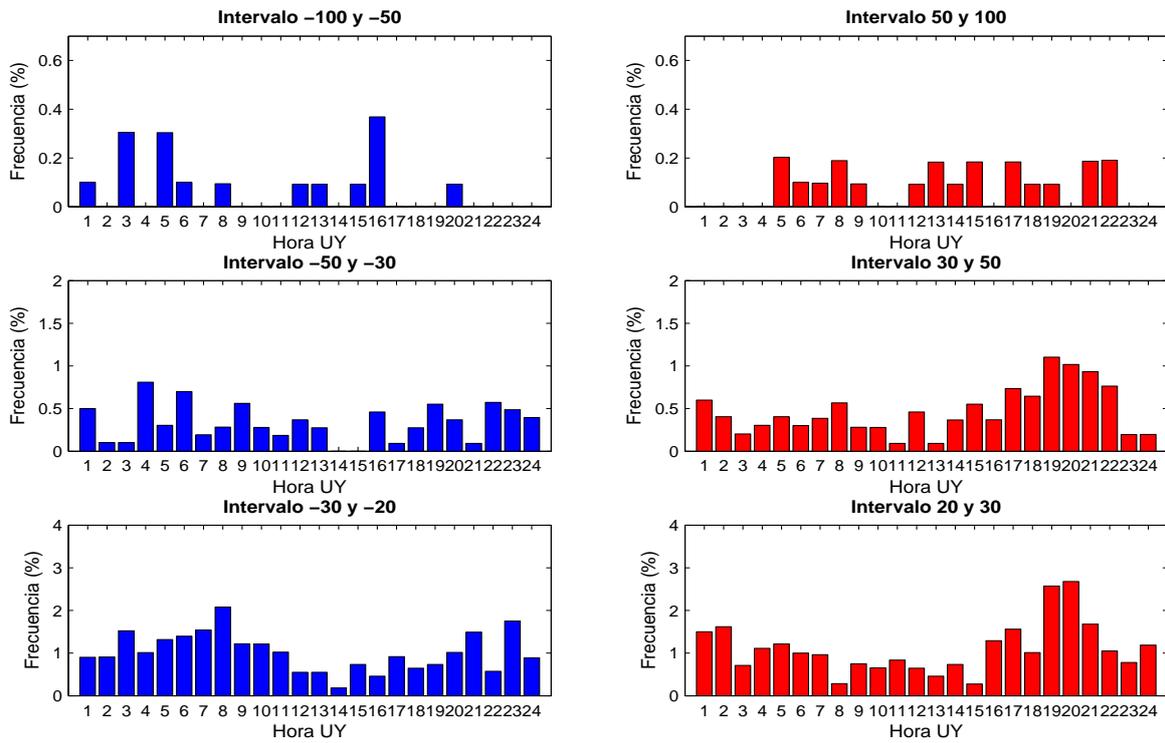


Figura B.17: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

## RAMP-DOWN. Eólico 5

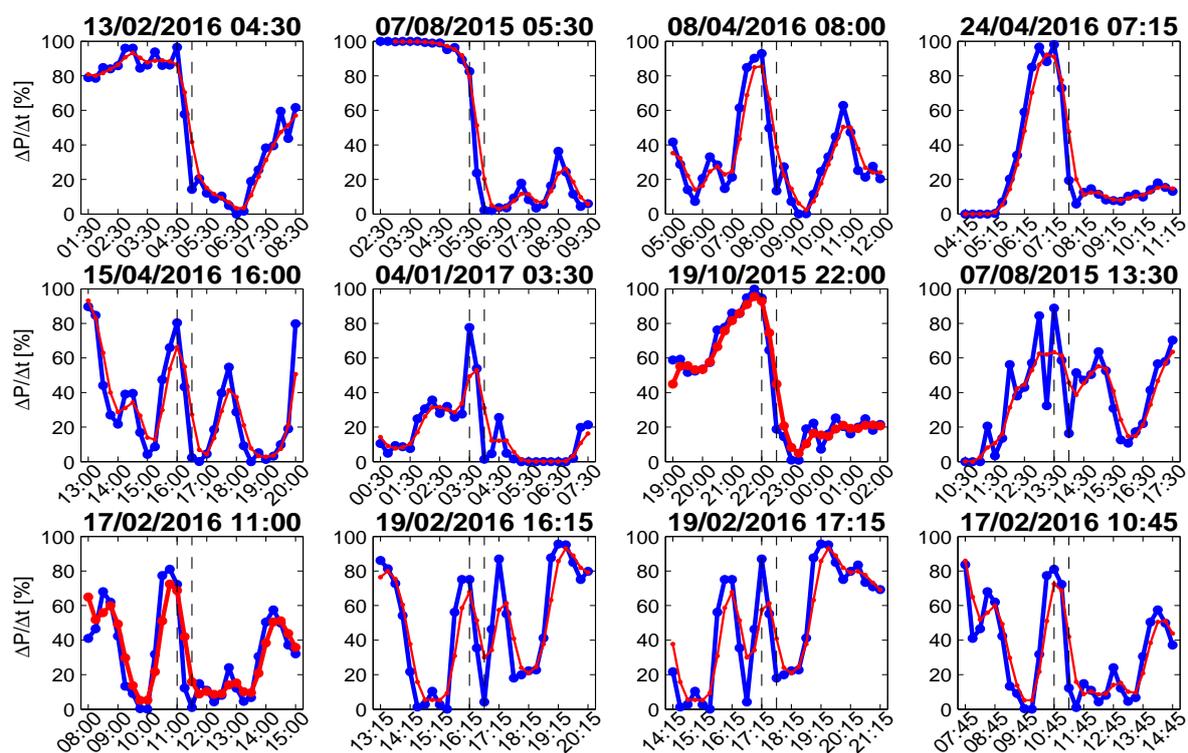


Figura B.18: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo. Parque 5

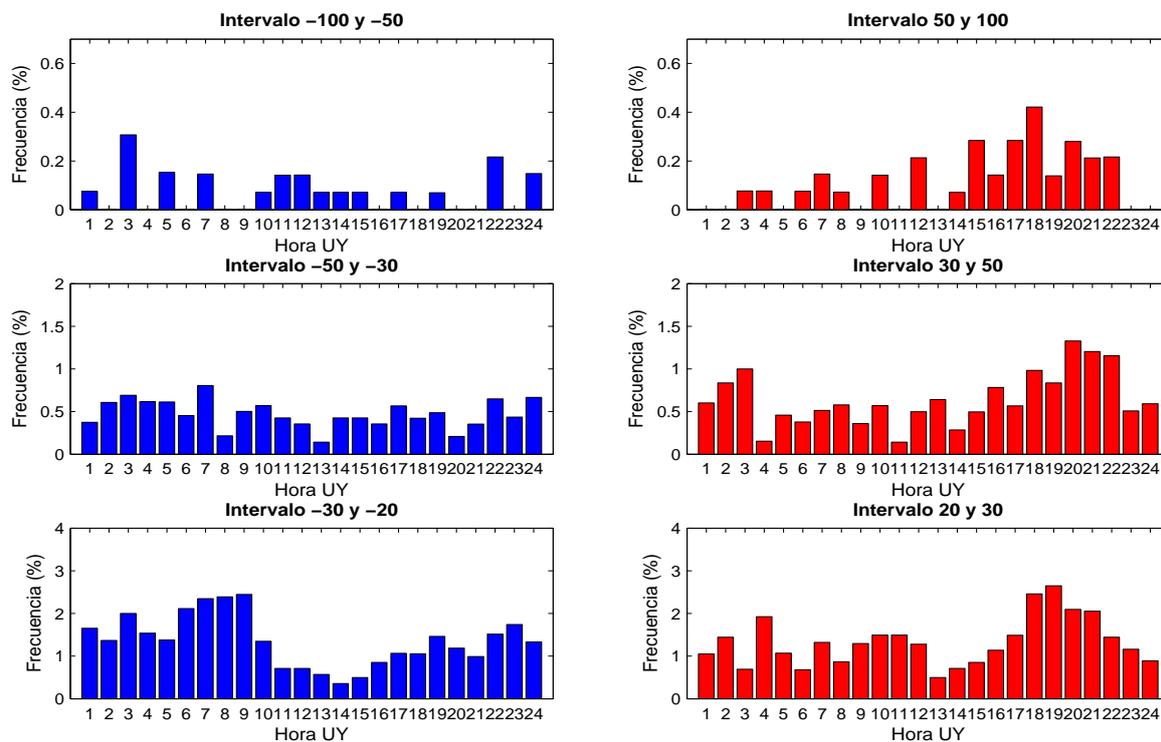


Figura B.19: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

## RAMP-DOWN. Eólico 7

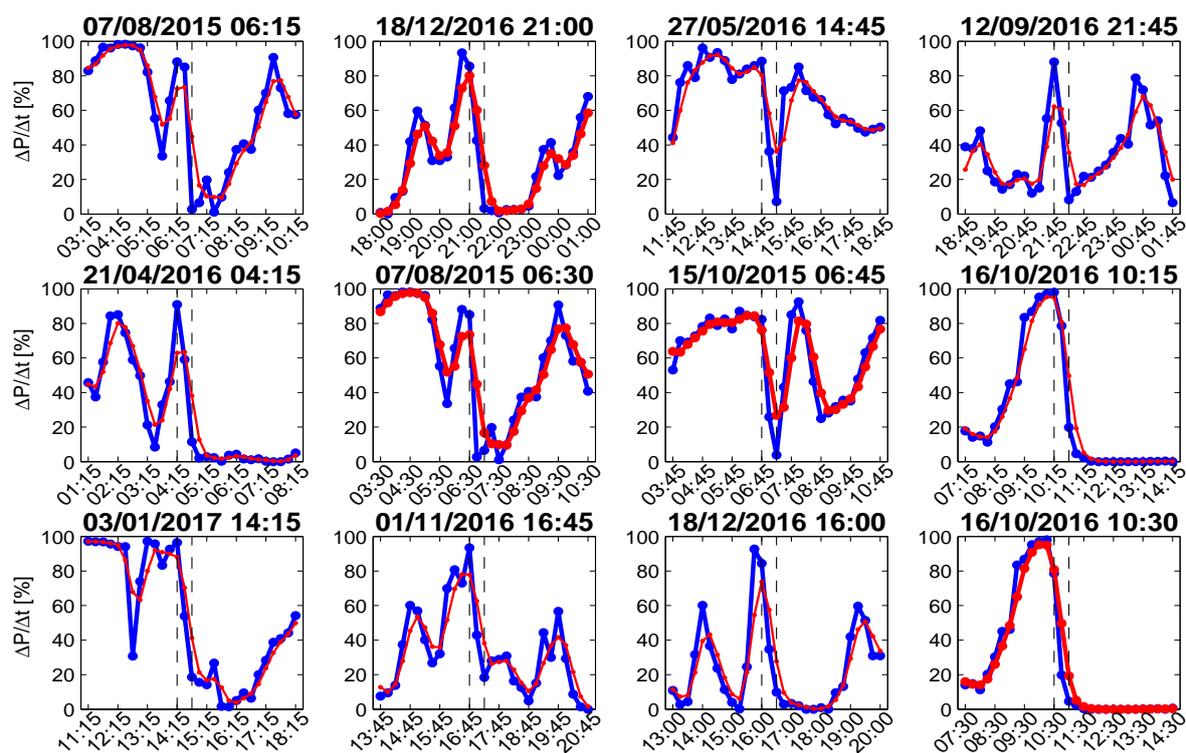


Figura B.20: Rampas 30' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 30' por intervalo. Parque 7

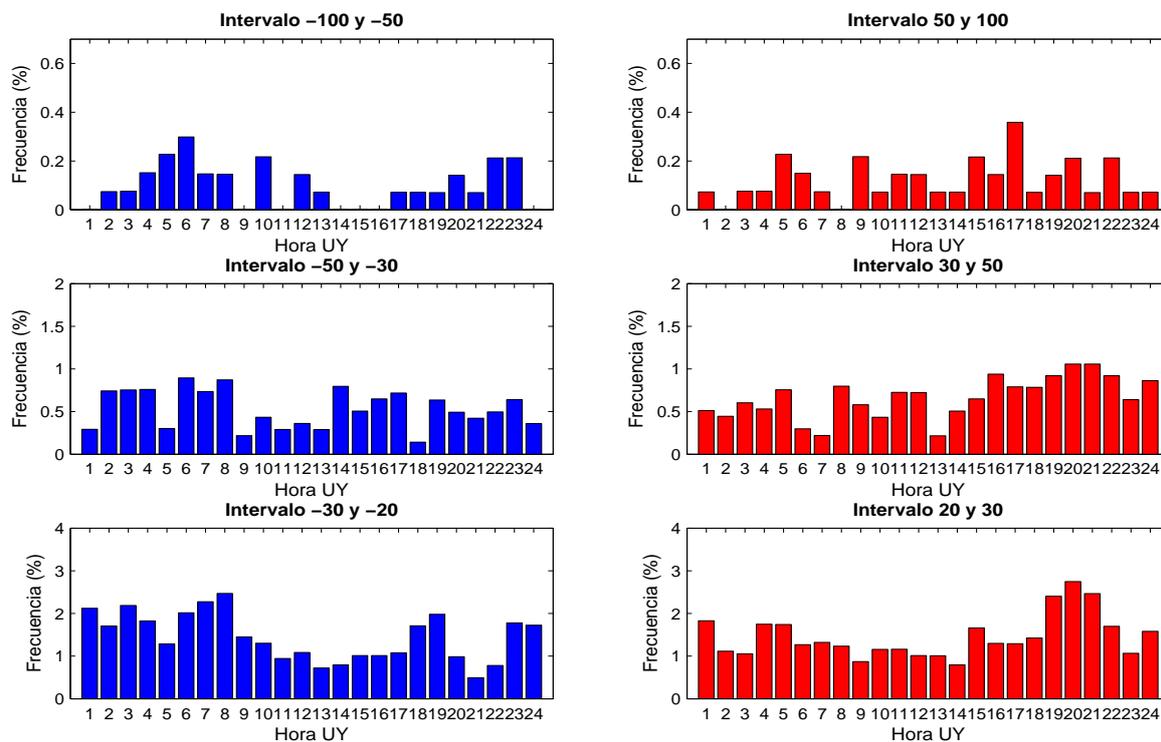


Figura B.21: Ciclo diario de rampas de 30' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

## Anexo C

### Resultados rampas 60'

RAMP-DOWN. Eólico 1

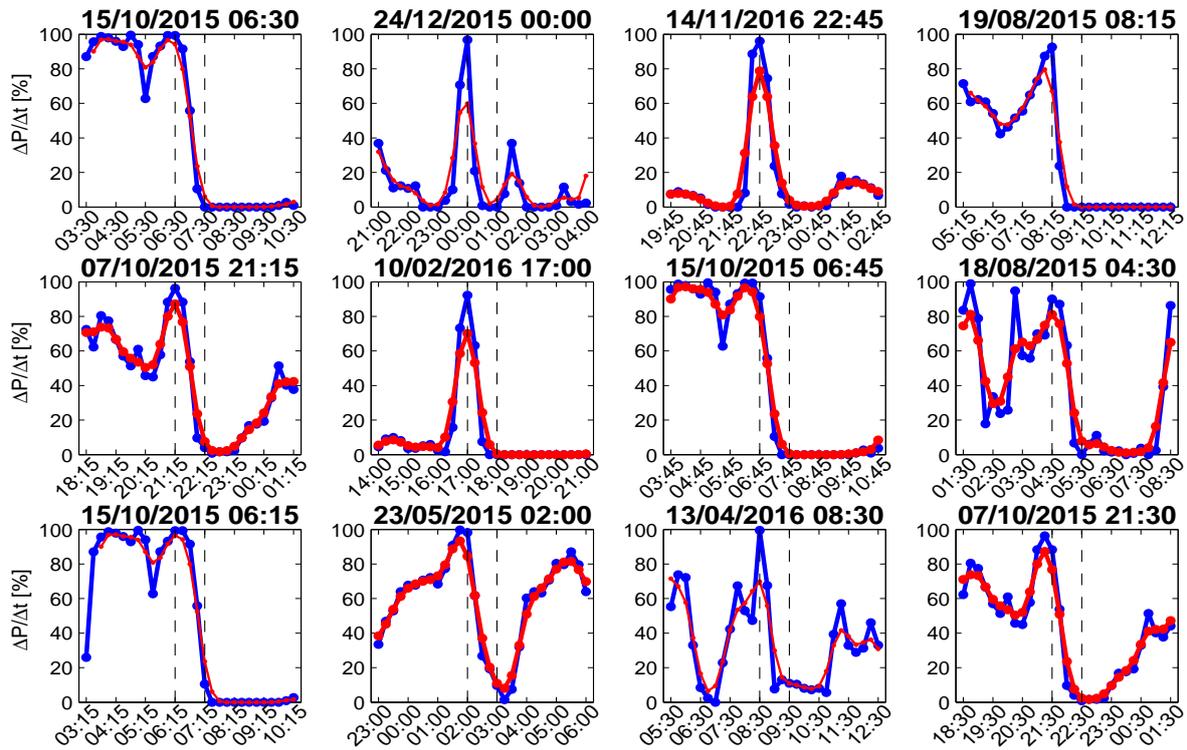


Figura C.1: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 1

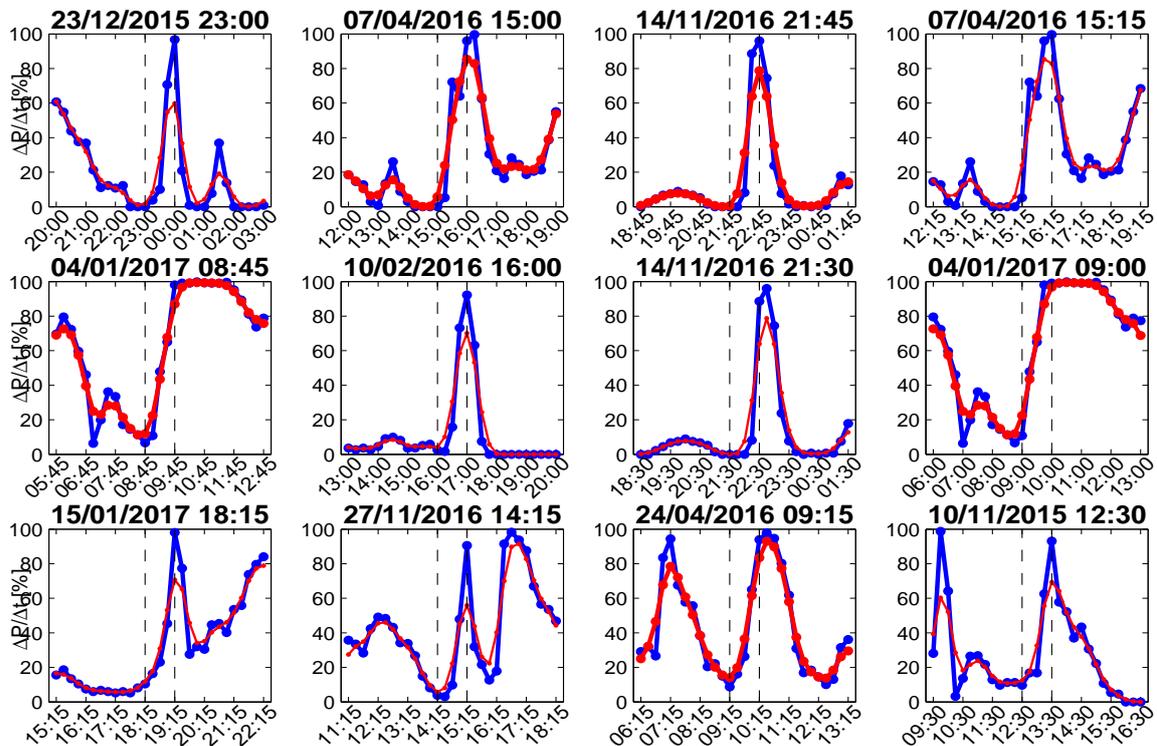


Figura C.2: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 1

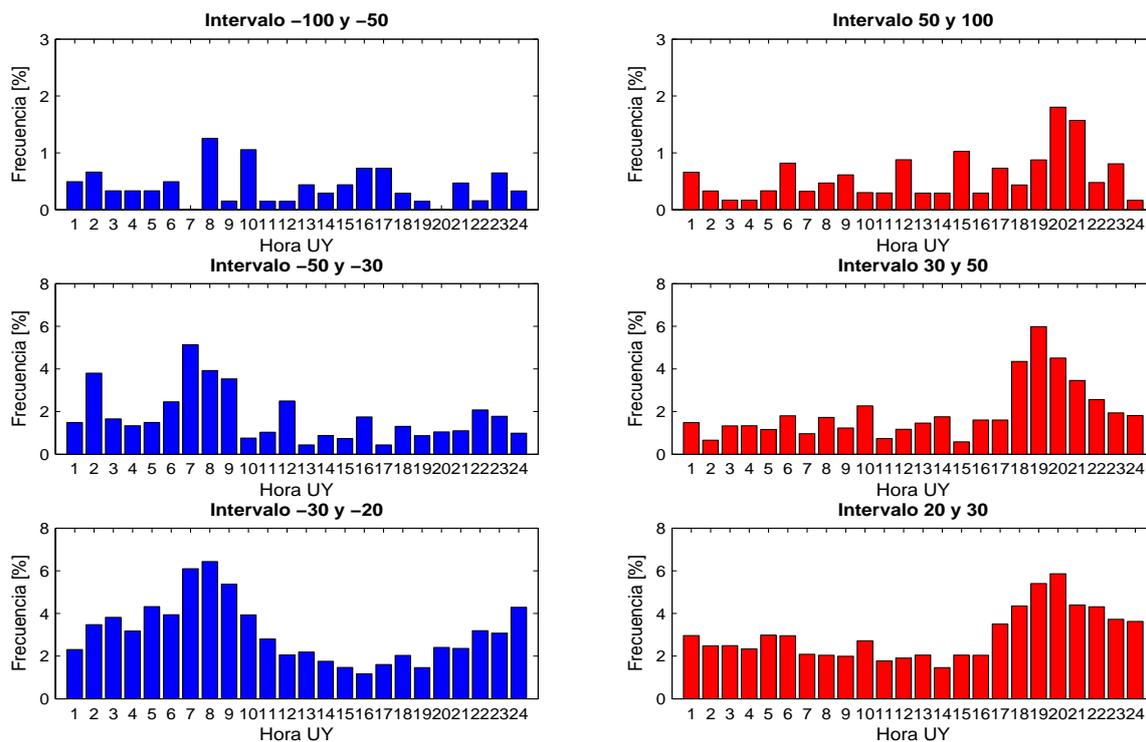


Figura C.3: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 2

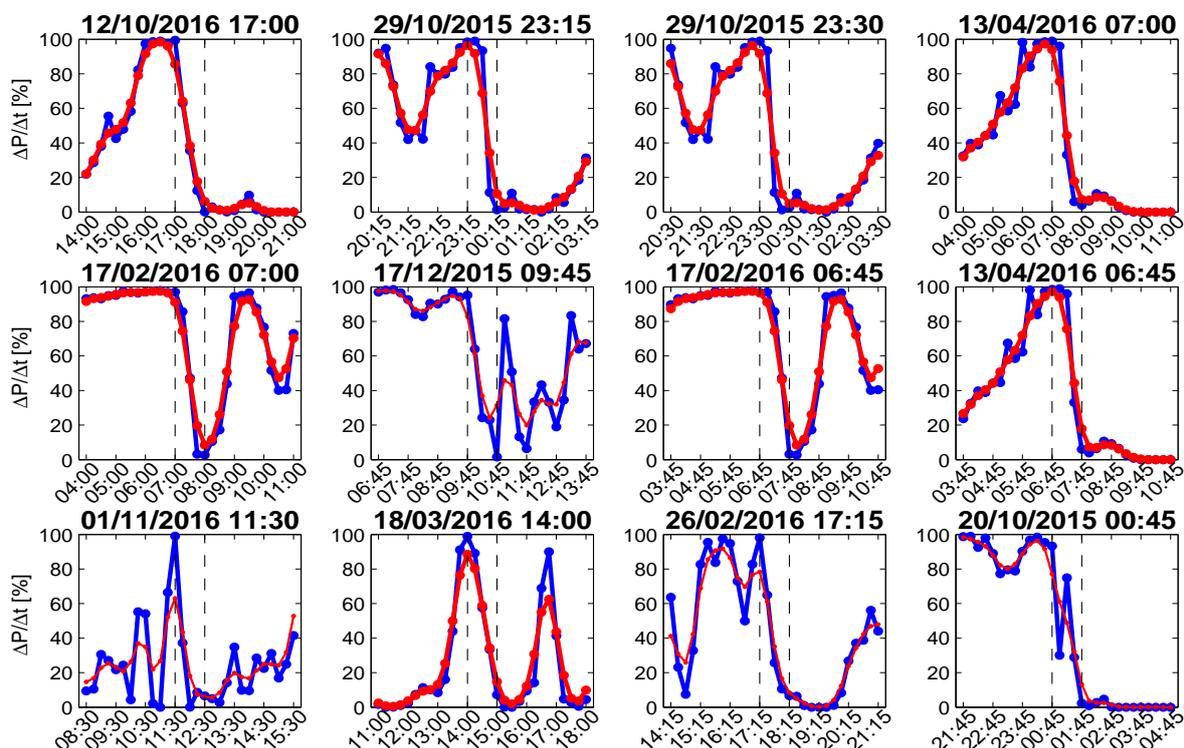


Figura C.4: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 2

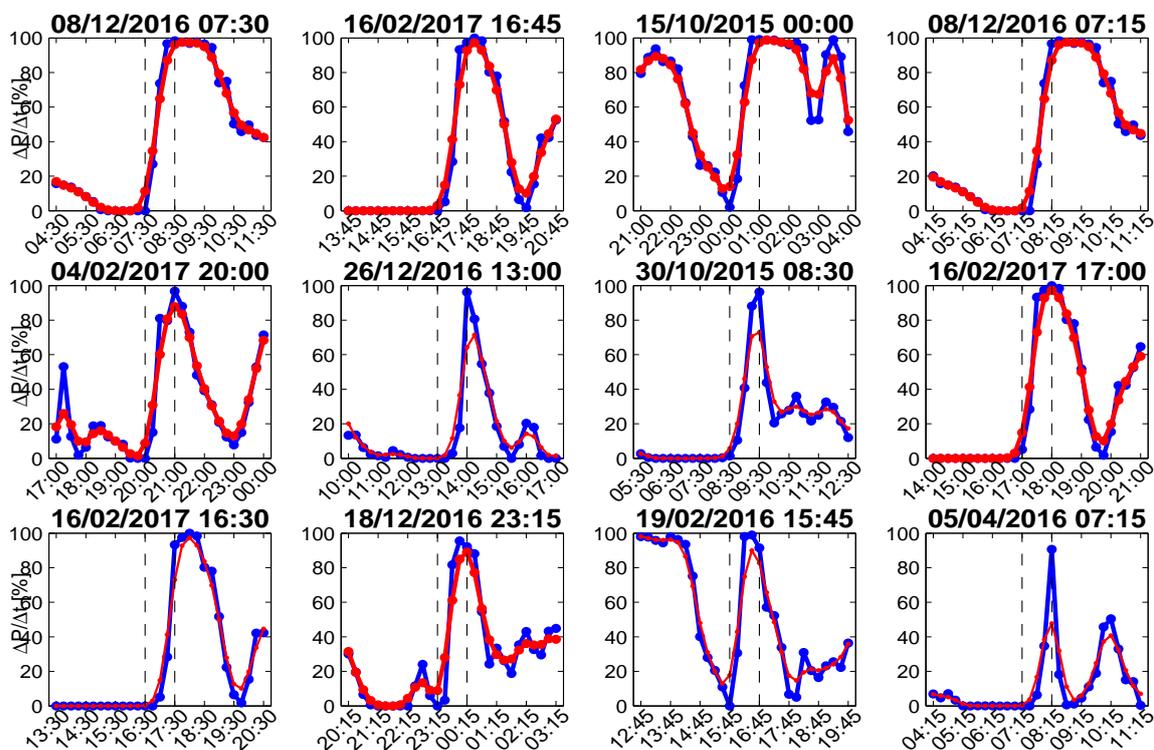


Figura C.5: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 2

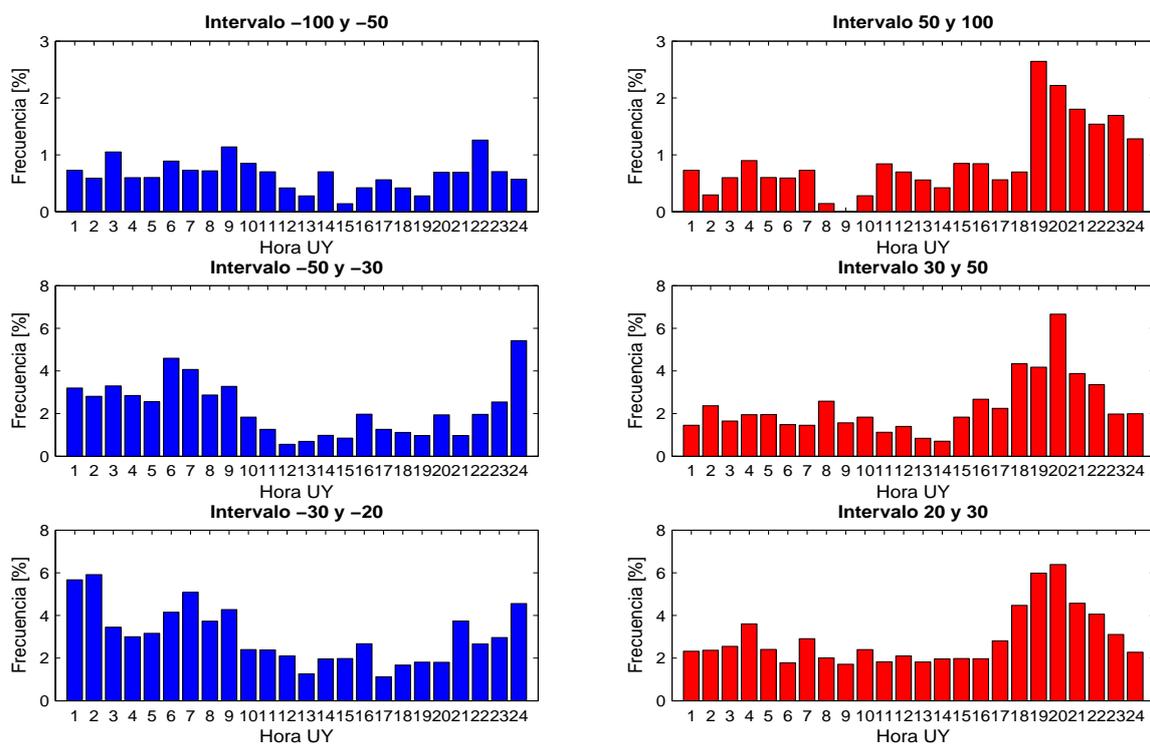


Figura C.6: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 3

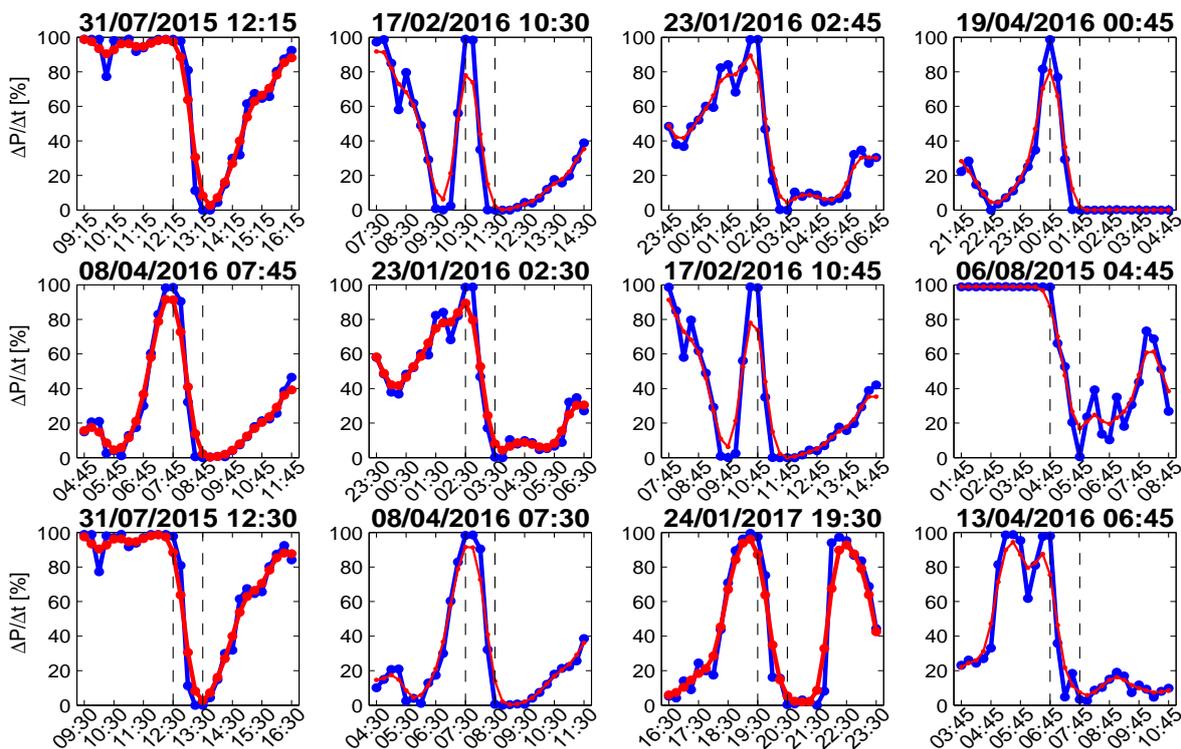


Figura C.7: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 3

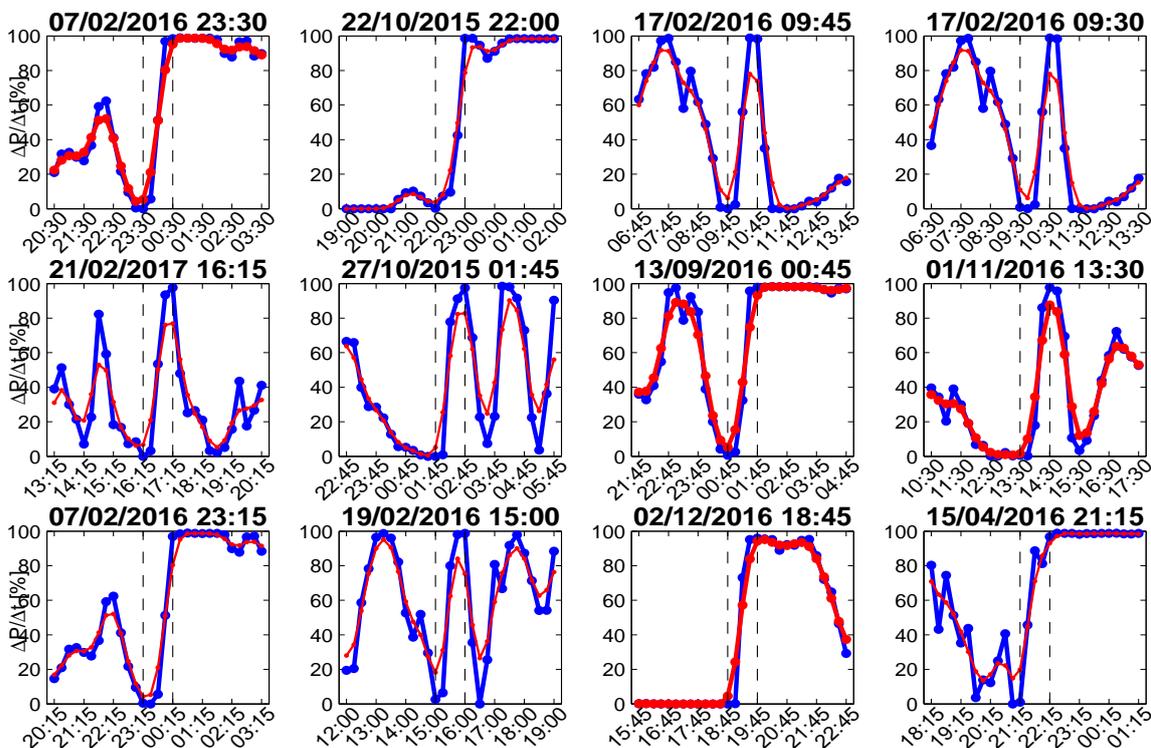


Figura C.8: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

## Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 3

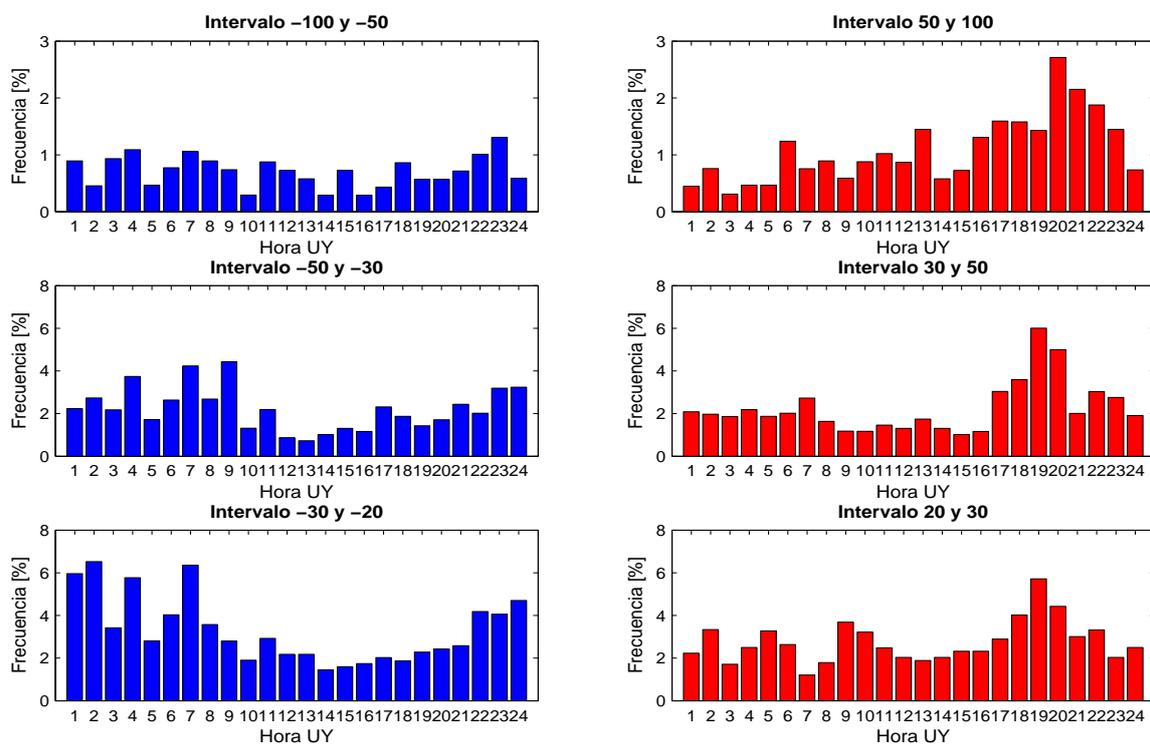


Figura C.9: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 4

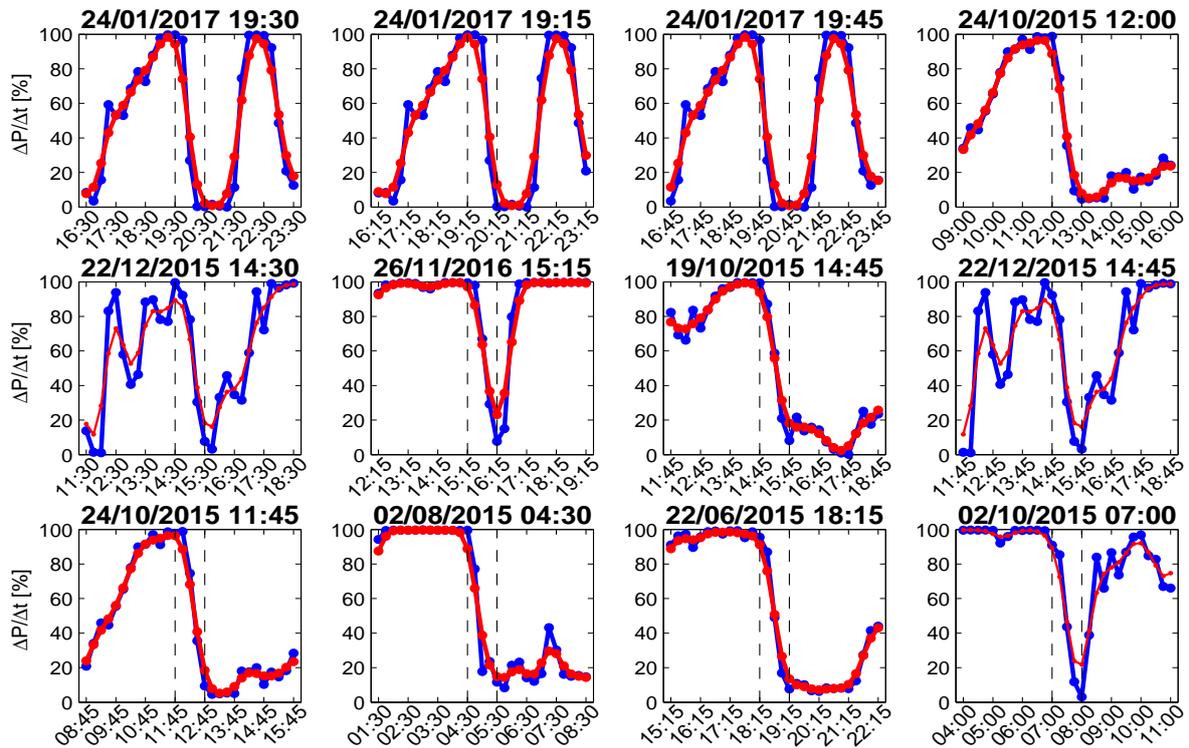


Figura C.10: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

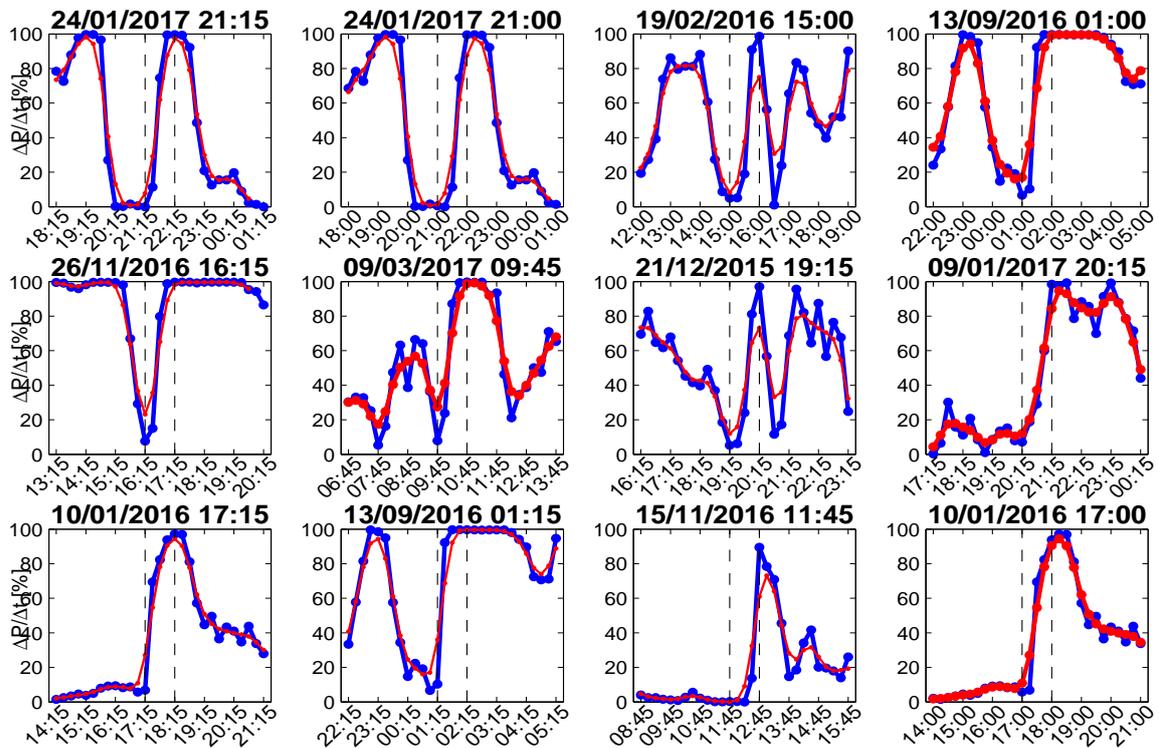


Figura C.11: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-DOWN. Eólico 4

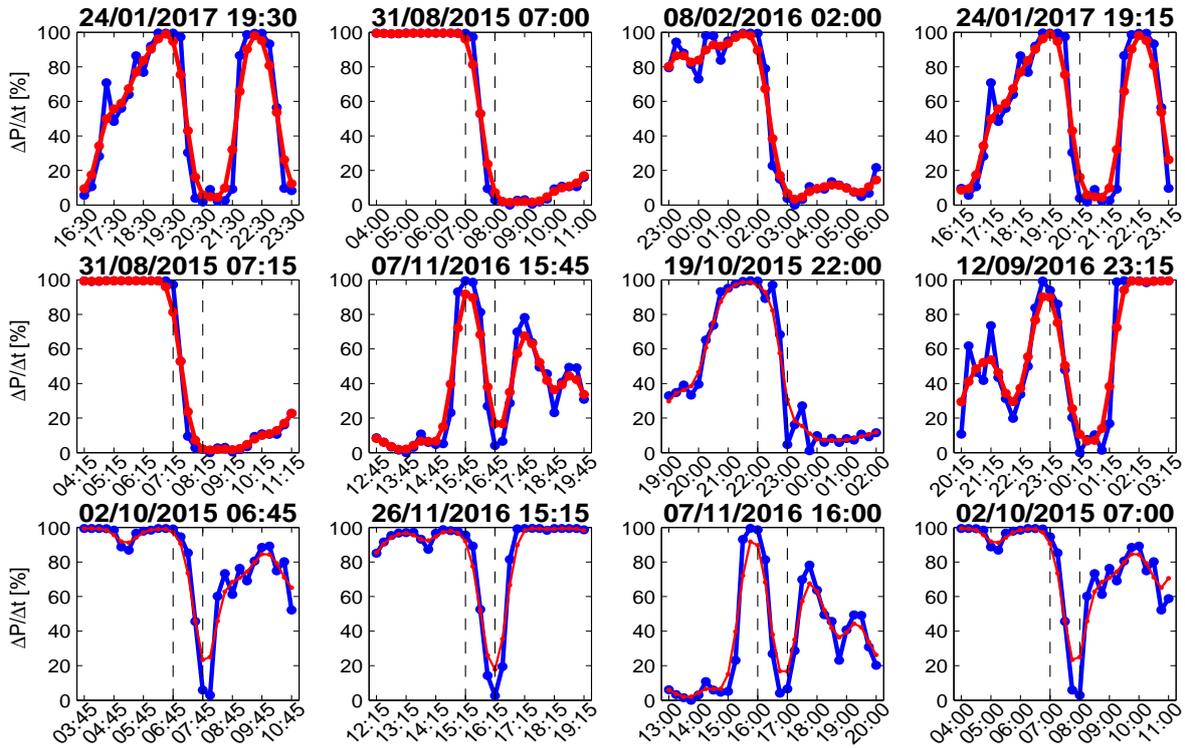


Figura C.12: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

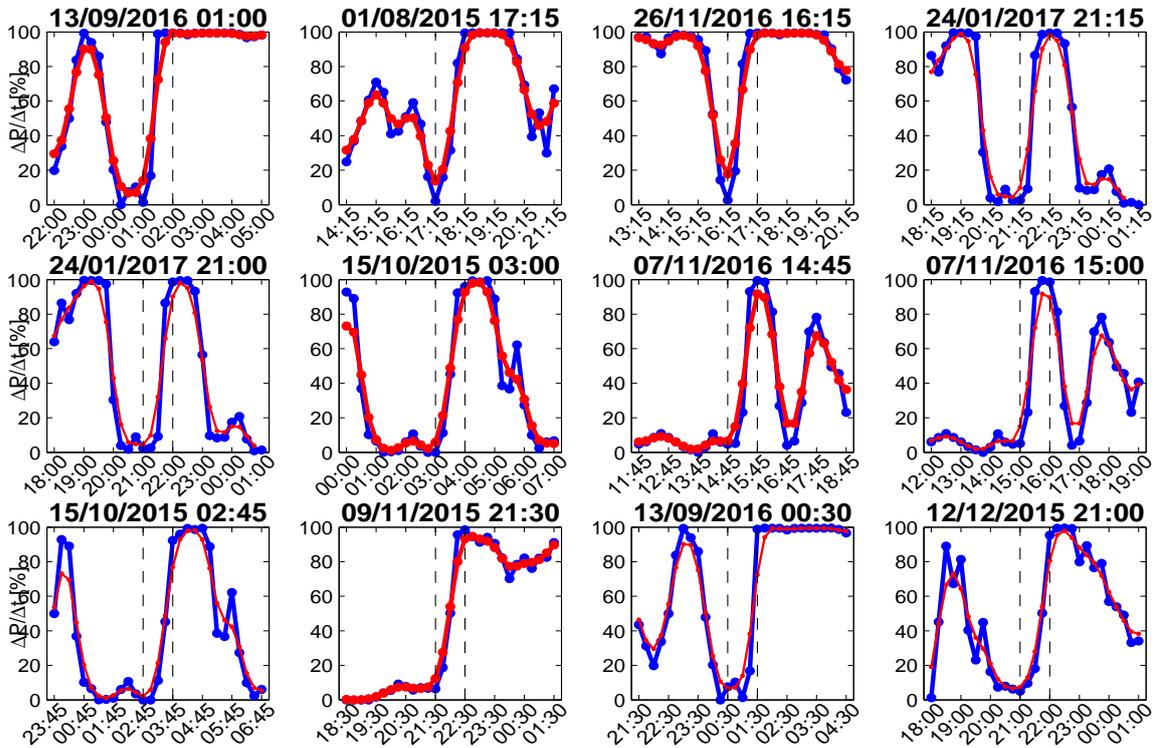


Figura C.13: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-DOWN. Eólico 4

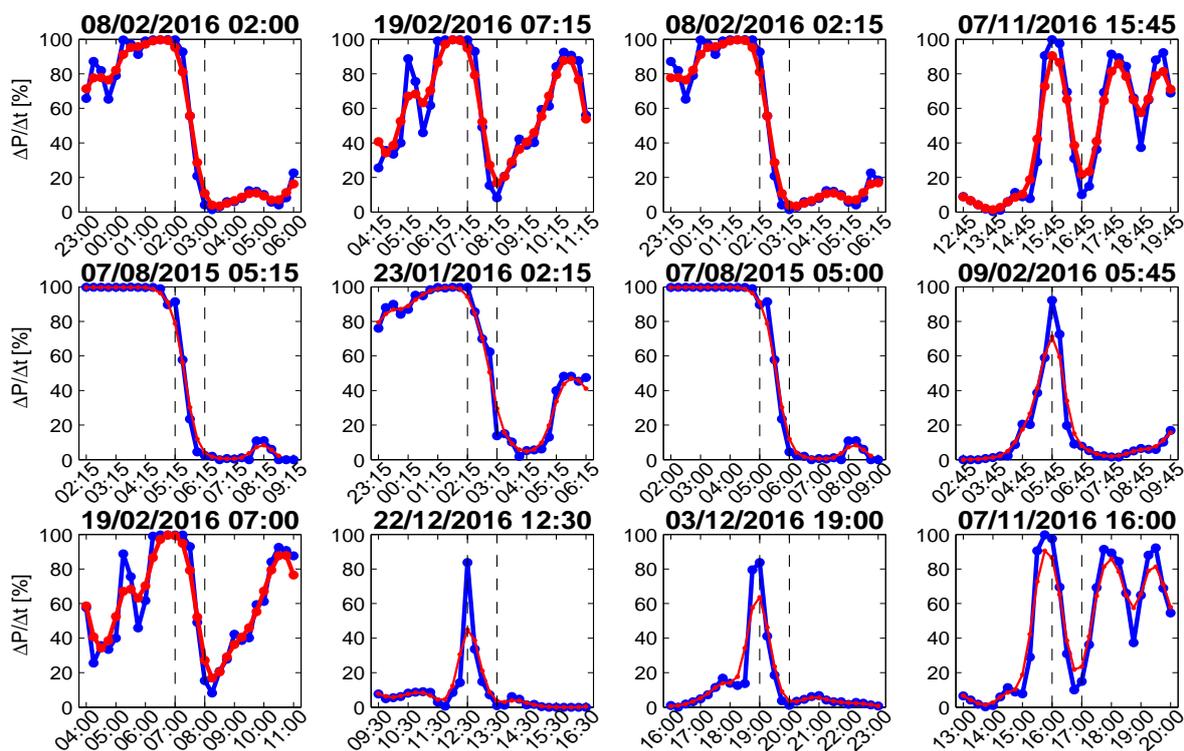


Figura C.14: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 4

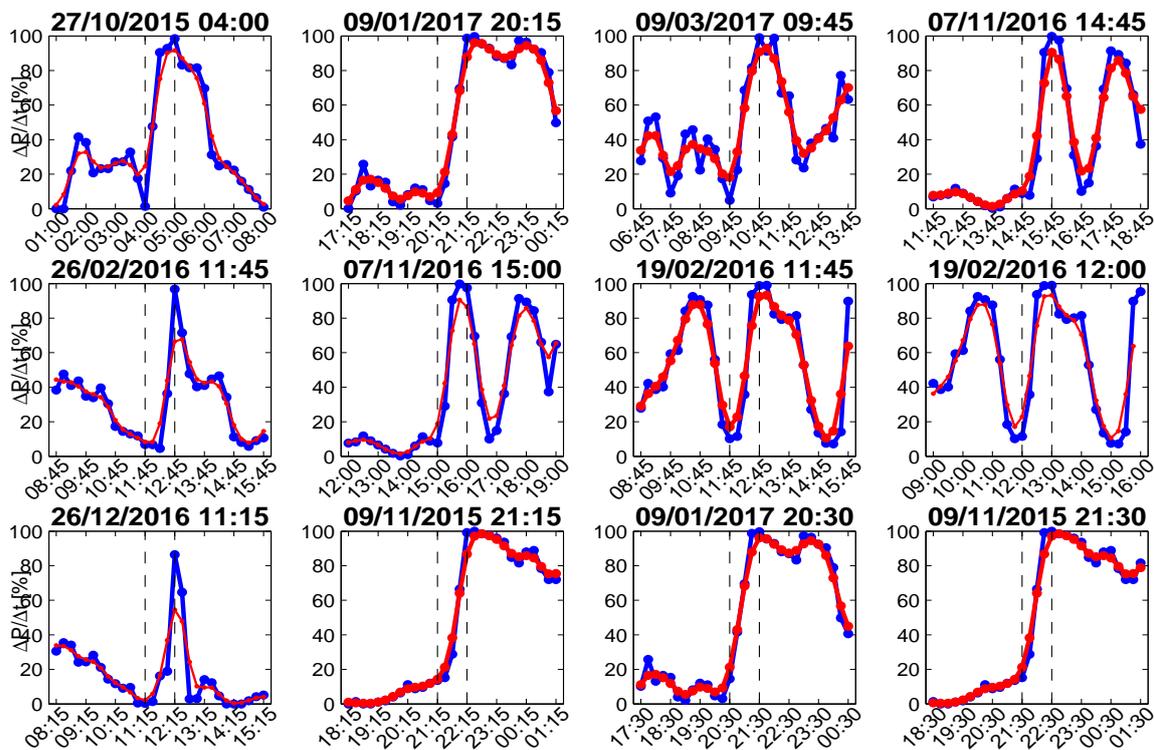


Figura C.15: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 4

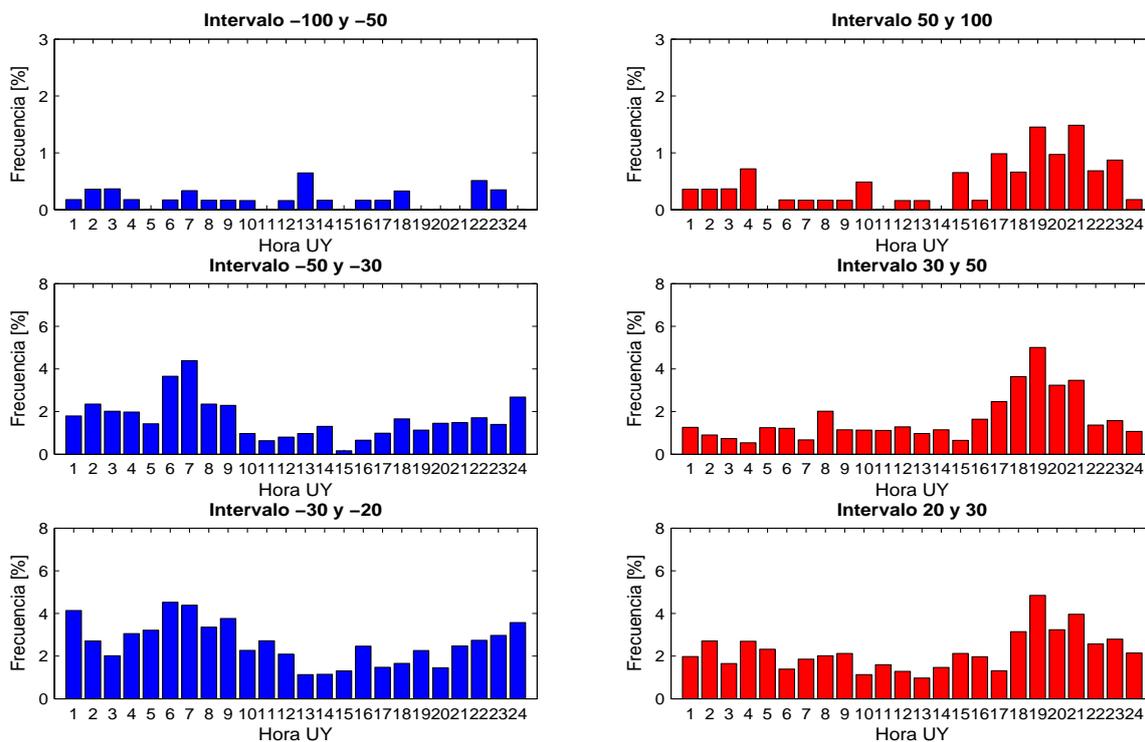


Figura C.16: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 6

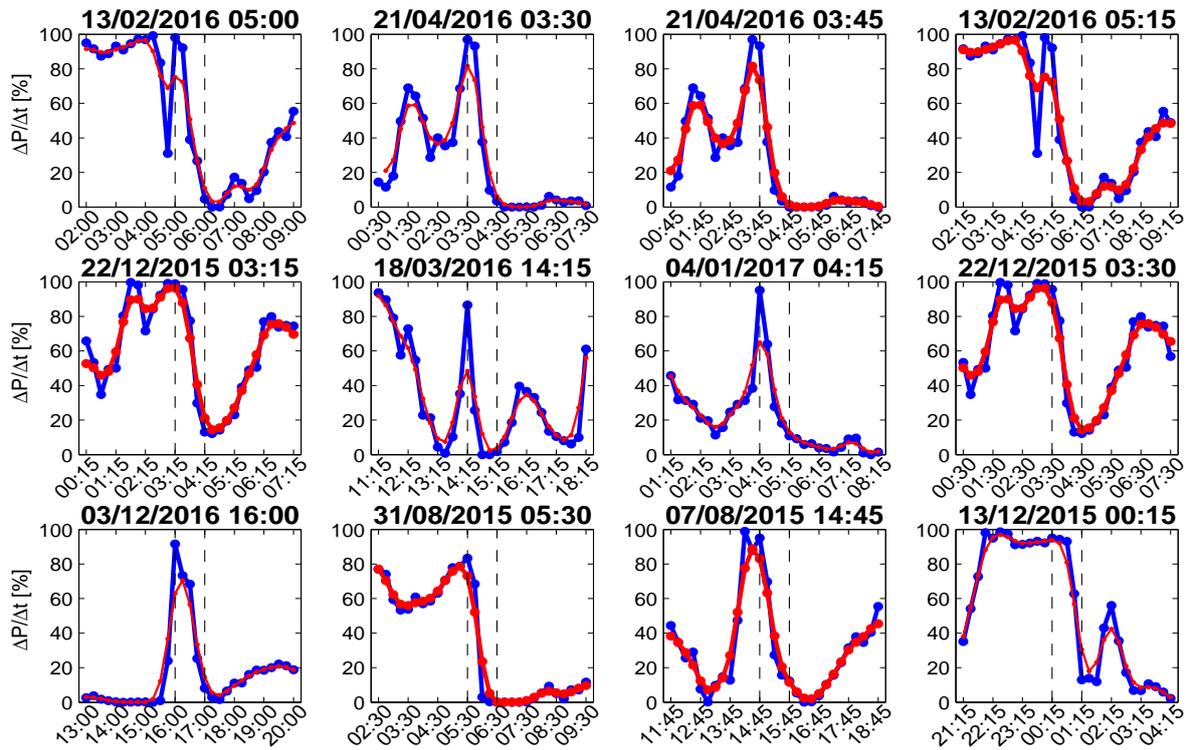


Figura C.17: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 6

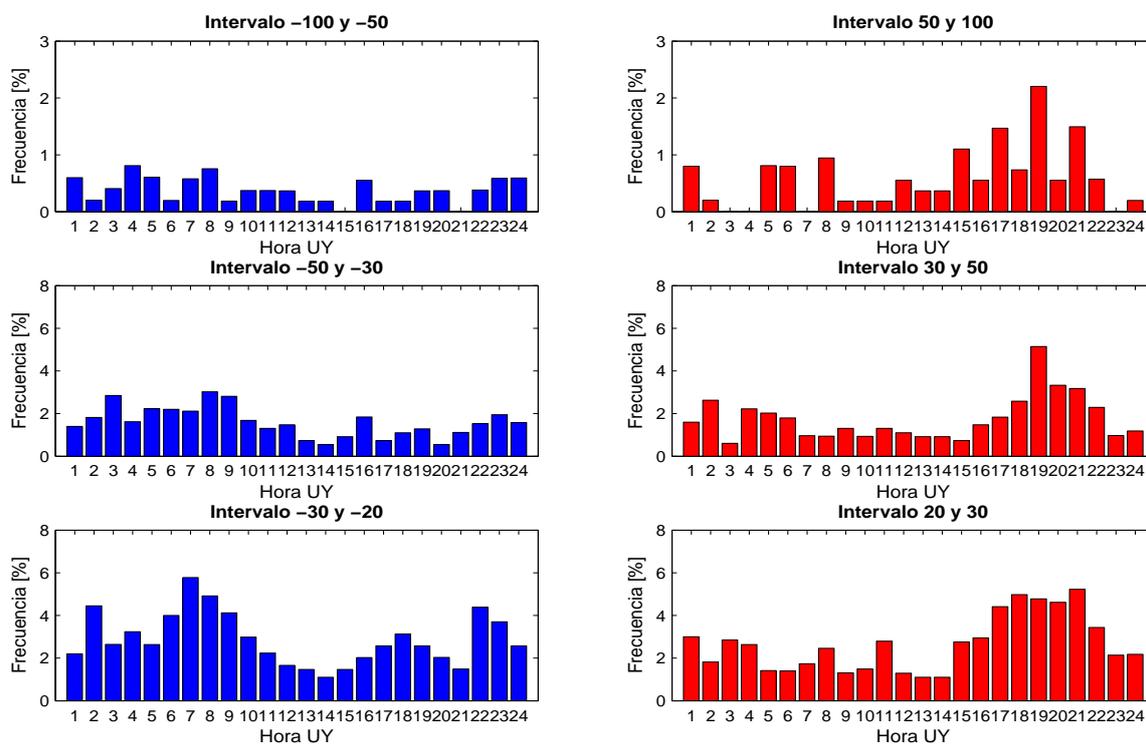


Figura C.18: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-DOWN. Eólico 5

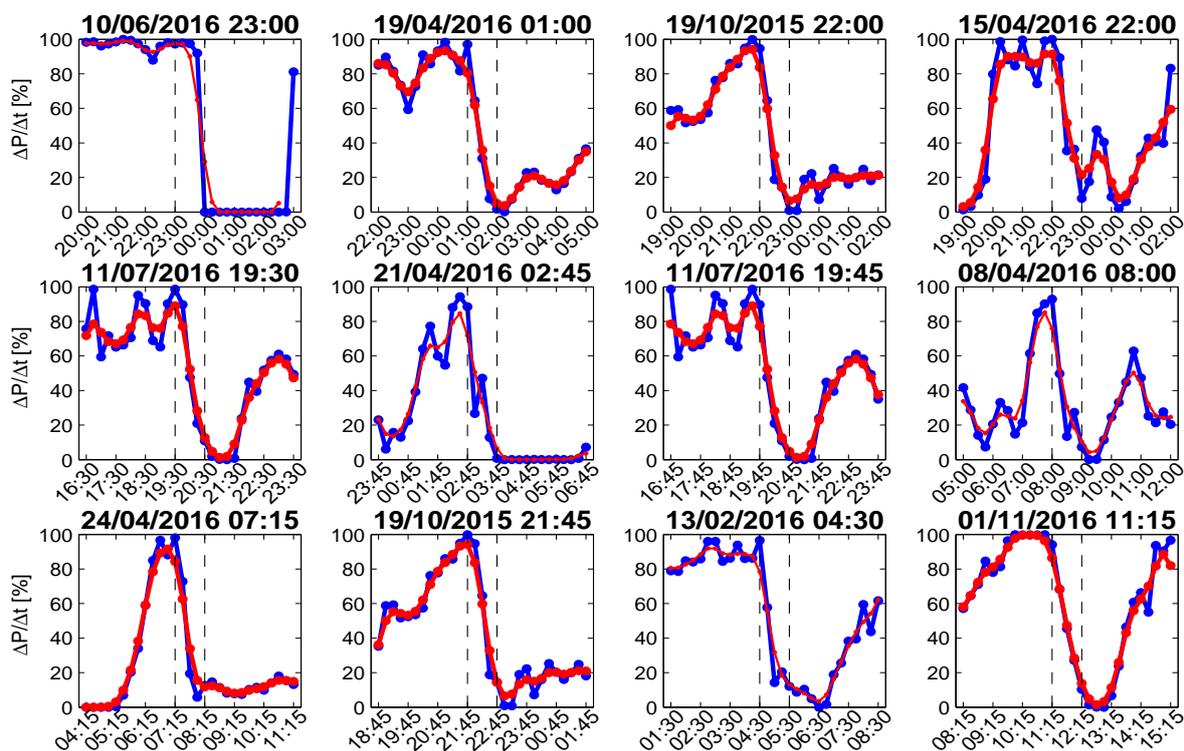


Figura C.19: Rampas 60' hacia abajo. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

RAMP-UP. Eólico 5

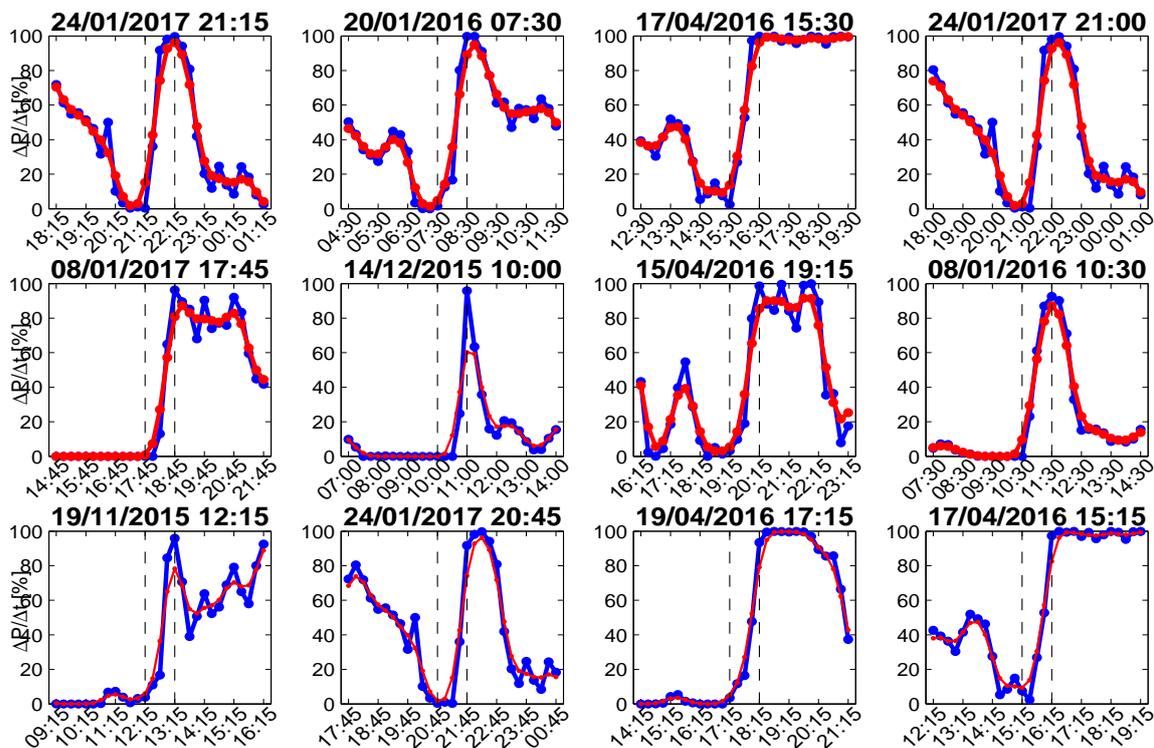


Figura C.20: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.

Variación diaria de rampas 60' por intervalo. Parque 5

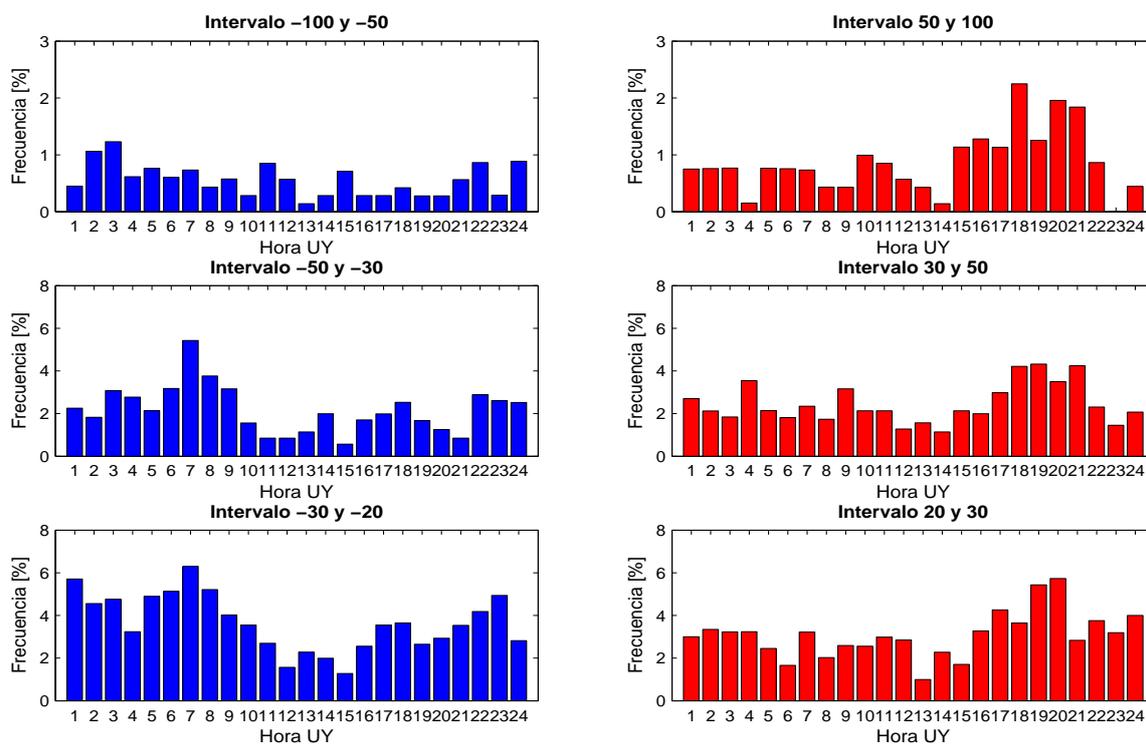


Figura C.21: Ciclo diario de rampas de 60' para diferentes intervalos de intensidad de rampa.

RAMP-UP. Eólico 7

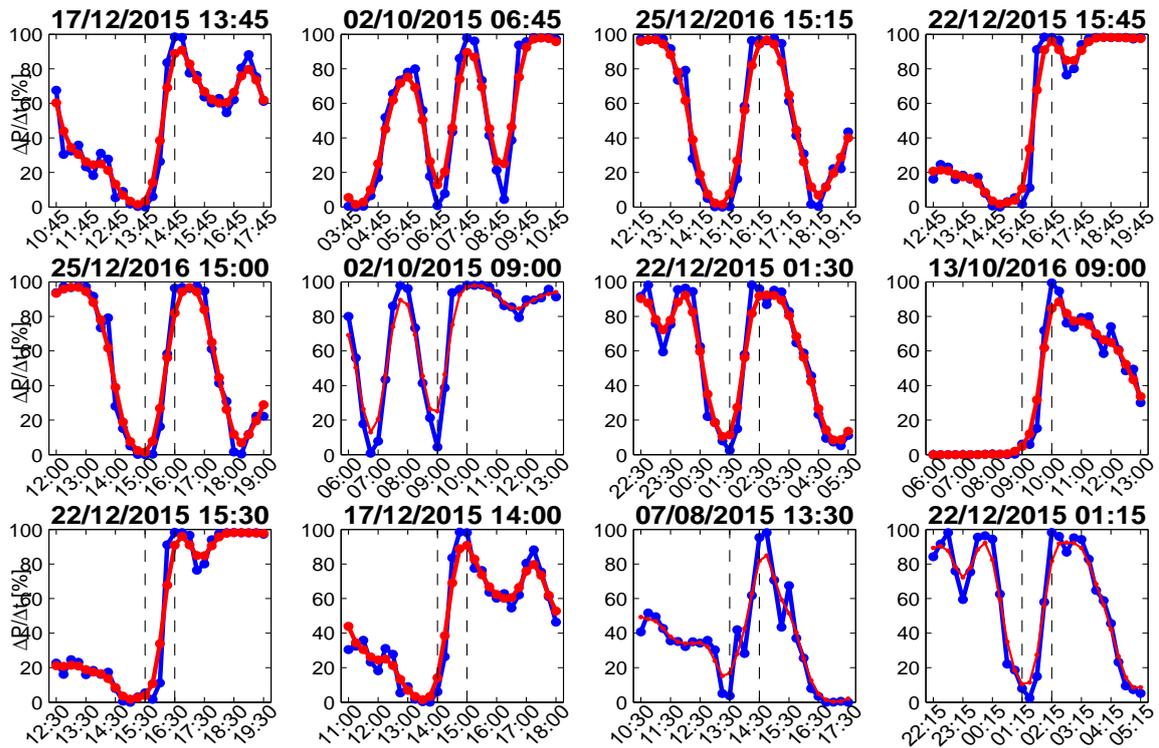


Figura C.22: Rampas 60' hacia arriba. En azul serie original y en rojo serie filtrada con filtro binomial de tres puntos.