

PARQUE SOLAR SUNNORTE

PRUEBAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DE
POTENCIA ACTIVA/FRECUENCIA DE LA PLANTA SOLAR
SUNNORTE 35 MW CONECTADA AL STR, SEGÚN LO
ESTABLECIDO EN EL ACUERDO C.N.O 1741

INFORME FINAL

DOCUMENTO IEB 951-23-03

REVISIÓN 1



Medellín, abril de 2024

Medellín

Cll. 8B No. 65-191 C.E Puerto Seco. OF. 331

+57 (4) 604 32 72 propuestas@ieb.co

Colombia: Medellín | Bogotá | Barranquilla | Cartagena
USA - Houston | Perú - Lima | Chile - Santiago | Guatemala - Ciudad de Guatemala

www.ieb.co



CONTROL DE DISTRIBUCIÓN

Copias de este documento han sido entregadas a:

Nombre	Dependencia	Empresa	Copias
Miguel Velásquez	Director Comercial Colombia	ECOENER	1
Servidor	<u>Alfresco</u>	Ingeniería Especializada S.A	1

Las observaciones que resulten de su revisión y aplicación deben ser informadas a IEB S.A.

CONTROL DE REVISIONES

Revisión	Fecha	Descripción	Elaboró	Revisó	Aprobó
0	02/04/2024	Emisión Inicial	<u>FGG/LDZ/CCM</u>	<u>DMM/GAG</u>	<u>RGV/FGG</u>
			FGG/LDZ/CCM	DMM/GAG	RGV/FGG
1	10/04/2024	Atención de comentarios emitidos por el subcomité de controles (Reunión 16/04/2024)	<u>LDZ</u>	<u>DMM/GAG</u>	<u>RGV/FGG</u>
			LDZ	DMM/GAG	RGV/FGG

Participaron en la elaboración de este informe:

FGG	Francisco Gafaro G	LDZ	Lukas Durán Zuluaga
CCM	Christian Cardona Morales	DMM	Daniel Manjarres Mur
RGV	Rolando Guisao Vélez	GAG	Gustavo Alonso Gutiérrez

Medellín

Cll. 8B No. 65-191 C.E Puerto Seco. OF. 331

+57 (4) 604 32 72 propuestas@ieb.co

Colombia: Medellín | Bogotá | Barranquilla | Cartagena
USA - Houston | Perú - Lima | Chile - Santiago | Guatemala - Ciudad de Guatemala

TABLA DE CONTENIDO

1.	INFORMACIÓN GENERAL PLANTA SOLAR SUNNORTE Y LAS PRUEBAS REALIZADAS	8
2.	DEFINICIONES.....	9
3.	ALCANCE DE ESTE INFORME.....	10
4.	MARCO NORMATIVO	10
5.	PRUEBAS DE ESTADISTMO Y TIEMPOS DE ESTABLECIMIENTO	13
6.	PRUEBAS DE BANDA MUERTA.....	40
7.	PRUEBAS DE VERIFICACION DE RECEPCION DE CONSIGNAS DE FORMA LOCAL.....	57
8.	PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE LAS RAMPAS OPERATIVAS.....	59
9.	CONCLUSIONES	87
10.	REFERENCIAS.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información general Planta Sunnorte.	8
Tabla 2. Descripción general prueba de estatismo y tiempo de establecimiento según acuerdo C.N.O 1741	13
Tabla 3. Cálculo del estatismo con escalones de frecuencia descendentes según lo establecido en el Anexo al Acuerdo C.N.O 1741	17
Tabla 4. Resultados prueba estatismo configurable al 6%	31
Tabla 5. Resultados prueba estatismo configurable al 2%	36
Tabla 6. Descripción general prueba de banda muerta según acuerdo C.N.O 1741	40
Tabla 7 Resultados prueba Banda Muerta - Caso configuración inicial con 30 mHz	43
Tabla 8. Resultados prueba Banda Muerta - Caso configuración mínimo con 0 mHz	48
Tabla 9. Resultados prueba Banda Muerta - Caso máximo 120 mHz	53
Tabla 10. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 7 %Pnom/min	60
Tabla 11. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 7 %Pnom/min	60
Tabla 12. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 10,5 %Pnom/min	66
Tabla 13. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 10,5 %Pnom/min	67
Tabla 14. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 14%/min	73
Tabla 15. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 14%/min	74
Tabla 16. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 100%/min	80
Tabla 17. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 100%/min	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Acuerdo C.N.O 1741 - Cálculo tiempo de establecimiento para escalón ascendente	14
Figura 2. Acuerdo C.N.O 1741 - Cálculo tiempo de establecimiento para escalón descendente	15
Figura 3. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 1 ...	18
Figura 4. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 2 ...	19
Figura 5. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 3 ...	19
Figura 6. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 4 ...	20
Figura 7. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 5 ...	20
Figura 8. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 6 ...	21
Figura 9. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 7 ...	21
Figura 10. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 8 ...	22
Figura 11. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 9 ...	22
Figura 12. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 1023	
Figura 13. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 1123	
Figura 14. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones positivos – Escalón 1 ..	24
Figura 15. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones positivos – Escalón 2 ..	24

Figura 16. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 3 ..	25
Figura 17. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 4 ..	25
Figura 18. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 5 ..	26
Figura 19. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 6 ..	26
Figura 20. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 7 ..	27
Figura 21. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 8 ..	27
Figura 22. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 9 ..	28
Figura 23. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 10	28
Figura 24. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadístico - escalones positivos – Escalón 11	29
Figura 25. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor máximo (6%) - Escalón negativo 1	32
Figura 26. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor máximo (6%) - Escalón negativo 2	33
Figura 27. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor máximo (6%) - Escalón positivo 1	33
Figura 28. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor máximo (6%) - Escalón positivo 2	34
Figura 29. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor mínimo (2%) - Escalón negativo 1	37
Figura 30. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor mínimo (2%) - Escalón negativo 2	38
Figura 31. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor mínimo (2%) - Escalón positivo 1	38
Figura 32. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadístico valor mínimo (2%) - Escalón positivo 2	39
Figura 33. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión	44
Figura 34. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión	44
Figura 35. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia vs tiempo (arriba) y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo (abajo)	45
Figura 36. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo	46
Figura 37. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso mínimo 0 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión	49
Figura 38. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso mínimo 0 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión	49
Figura 39. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso mínimo 0 mHz. Frecuencia vs tiempo (arriba) y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo (abajo)	50
Figura 40. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso mínimo 0 mHz. Frecuencia y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo	51
Figura 41. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión	54
Figura 42. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión	55

Figura 43. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia vs tiempo (arriba) y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo (abajo) 55	
Figura 44. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo	56
Figura 45. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba recepción de consigna local – Escalón ascendente.....	58
Figura 46. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba recepción de consigna local – Escalón descendente.....	58
Figura 47. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	61
Figura 48. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	61
Figura 49. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	62
Figura 50. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	62
Figura 51. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	63
Figura 52. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	63
Figura 53. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	64
Figura 54. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	64
Figura 55. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	65
Figura 56. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	65
Figura 57. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	67
Figura 58. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	68
Figura 59. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	69
Figura 60. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	69
Figura 61. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	70
Figura 62. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	70
Figura 63. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	71
Figura 64. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	71
Figura 65. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón	

4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	72
Figura 66. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	72
Figura 67. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	75
Figura 68. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	75
Figura 69. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	76
Figura 70. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	76
Figura 71. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	77
Figura 72. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	77
Figura 73. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	78
Figura 74. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	78
Figura 75. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	79
Figura 76. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	79
Figura 77. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	82
Figura 78. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	82
Figura 79. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	83
Figura 80. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	83
Figura 81. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	84
Figura 82. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	84
Figura 83. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	85
Figura 84. . Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	85
Figura 85. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	86
Figura 86. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.....	86

1. INFORMACIÓN GENERAL PLANTA SOLAR SUNNORTE Y LAS PRUEBAS REALIZADAS

En la Tabla 1 se muestra la ubicación geográfica de la planta Sunnorte, sus características técnicas y la fecha de ejecución de las pruebas.

Tabla 1. Información general Planta Sunnorte.

Nombre de la planta y tipo de generación.	Parque Fotovoltaico Sunnorte 35 MW - Generación Solar fotovoltaica
Ubicación geográfica de la planta.	Norte de Santander / Ocaña Latitud: 8.22494 Longitud: -73.3228225
Punto de Conexión	Subestación Ocaña 115 kV
CEN	35 MW
Número de módulos fotovoltaicos (plantas solares fotovoltaicas).	75.060 módulos
Modelo, fabricante y número de inversores.	109 inversores de la marca SUNGROW, referencia SG350HX – Capacidad nominal 352 kVA (@30°C) / 320 kVA (@40°C).
Fecha ejecución pruebas del control de potencia activa/frecuencia	Febrero 8 a febrero 10 de 2024
Equipo de medición utilizado	Medición a través del PPC de la planta con una resolución de 20 muestras por segundo

2. DEFINICIONES

Estatismo: Característica técnica de una planta de generación, que determina la variación porcentual de potencia por cada unidad de variación porcentual de frecuencia. Para el caso en que la banda muestra del control de potencia activa/frecuencia se encuentre deshabilitada, el estatismo se calcula según la siguiente expresión¹:

$$R = \frac{\Delta f / f_{nom}}{\Delta P / P_{nom}}$$

Δf : Magnitud de variación de frecuencia en Hz aplicada

ΔP : Magnitud de variación de la potencia en MW debida a la variación de la frecuencia

STR: Sistema de Transmisión Regional

Tiempo de establecimiento (Te): Tiempo que tarda la potencia en entrar a la banda del +- 3% respecto al tamaño del cambio esperado y mantenerse en esa banda después de haber sido sometida a un escalón en la frecuencia.

Tiempo de respuesta inicial (Tr): Tiempo que tarda la potencia en salir de la banda del \pm 3% respecto al tamaño del cambio esperado después de haber sido sometida a un escalón en la frecuencia

¹ Ecuación 81) del Anexo al Acuerdo C.N.O 1741

3. ALCANCE DE ESTE INFORME

Validar el cumplimiento de lo establecido en la resolución CREG 060 de 2019 con respecto al estatismo, banda muerta, tiempo de respuesta inicial y tiempo de establecimiento del control de potencia activa/frecuencia en la planta solar fotovoltaica Sunnorte conectada al STR, siguiendo los lineamientos definidos en el acuerdo CNO 1741.

Verificar el cumplimiento de lo establecido en la resolución CREG 060 de 2019 con respecto a las características de rampas operativas de la planta solar fotovoltaica Sunnorte conectada al STR, siguiendo los lineamientos definidos en el acuerdo CNO 1741.

4. MARCO NORMATIVO

Requisitos técnicos asociados a las pruebas para la entrada en operación comercial de las plantas solares conectadas en el STR

Según lo establecido en el artículo 18 de la resolución CREG 060 de 2019 [1]:

- Antes de declararse en operación comercial, las plantas eólicas y solares fotovoltaicas, conectadas al STN y STR, deben realizar y remitir los resultados de las siguientes pruebas al CND, de acuerdo con los términos y plazos establecidos mediante Acuerdo C.N.O:
 - Pruebas de la curva de capacidad de que trata el literal b del numeral 5.7 del Código de Operación que hace parte del anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995.
 - **Pruebas de las características del control de potencia activa/frecuencia de que trata el artículo 4 de la Resolución CREG 023 de 2001.**
 - **Pruebas de rampa operativa de entrada y salida de que trata el numeral 5.8 del Código de Operación que hace parte del anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995.**
 - Pruebas de las características del control de potencia reactiva/tensión de que trata el literal a del numeral 5.7 del Código de Operación que hace parte del anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995.
 - Pruebas de desempeño de respuesta rápida en frecuencia de que trata el numeral 5.6.3 del Código de Operación que hace parte del anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995.
 - Pruebas a las características de operación ante depresiones de tensión y sobretensiones para plantas eólicas y solares fotovoltaicas de que trata el literal c del numeral 5.7 del Código de Operación que hace parte del anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995. El C.N.O definirá mediante Acuerdo el contenido y el proceso de aceptación de certificados de laboratorio o fábrica de

esta prueba. En todo caso, dichos certificados deberán estar avalados por entidades a nivel nacional o internacional, según el caso.

- Pruebas a los requerimientos de priorización en la inyección rápida de corriente reactiva de que trata el literal d del numeral 5.7 del Código de Operación que hace parte del anexo general de la Resolución CREG 025 de 1995. El C.N.O definirá mediante Acuerdo el contenido y el proceso de aceptación de certificados de laboratorio o fábrica de esta prueba. En todo caso, dichos certificados deberán estar avalados por entidades a nivel nacional o internacional, según el caso.

Según lo establecido en el numeral 7.4.7.1 del Anexo 1 del Acuerdo C.N.O 1612 [2], por el cual se aprueba la actualización del "Procedimiento para la puesta en operación de proyectos de transmisión que incluyan activos de uso del Sistema de Transmisión Nacional - STN -, del Sistema de Transmisión Regional - STR -, de usuarios conectados directamente al STN, al STR y de recursos de generación", se debe emitir, para la entrada en operación comercial de las plantas solares conectadas al STR, un Acuerdo C.N.O con el resultado de las siguientes pruebas:

- Pruebas de la curva de capacidad, Potencia reactiva (PQ).
- **Pruebas de las características del control de potencia activa/frecuencia (Estatismo(s) potencia/frecuencia).**
- **Pruebas de rampa operativa de entrada y salida.**
- Pruebas de las características del control de potencia reactiva/tensión (Estatismo potencia reactiva/tensión).
- Pruebas a las características de operación ante depresiones de tensión y sobretensiones.
- Pruebas a los requerimientos de priorización en la inyección rápida de corriente reactiva.

Requisitos técnicos asociados al control de potencia activa y frecuencia de las plantas solares conectadas al STR

Según lo establecido en el artículo 12 de la resolución CREG 060 de 2019 [1]:

- Las plantas eólicas y solares fotovoltaicas, conectadas al STN y STR, deben tener un control de potencia activa/frecuencia que incluya una banda muerta y un estatismo permanente ajustable, permitiendo su participación en la regulación primaria de frecuencia del sistema.
- El control debe tener la capacidad de recibir al menos una consigna de potencia activa de forma local.
- El control de potencia activa/frecuencia de las plantas eólicas y solares fotovoltaicas, conectadas al STN y STR, debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Ser estable: las señales de salida del control deben ser amortiguadas en el tiempo ante señales de entrada escalón, para todos los modos y condiciones operativas.
- El estatismo debe ser configurable en un rango entre el 2% y el 6%.
- La banda muerta debe ser configurable en un rango entre 0 y 120 mHz. Inicialmente deberán tener una Banda Muerta de respuesta a los cambios de frecuencia menor o igual a 30 mHz.
- El ajuste de la función de control de frecuencia para eventos de subfrecuencia y sobrefrecuencia debe ser reportado al CND por el agente que representa la planta antes de las pruebas para entrada en operación comercial. La función de control de frecuencia para eventos de subfrecuencia y sobrefrecuencia debe ser reajustada en caso de que en la operación se identifiquen riesgos a la seguridad del SIN.
- Los parámetros de ganancia y constantes de tiempo deben poder ser modificados para cumplir con criterios de estabilidad y velocidad de respuesta del SIN, teniendo en cuenta las características técnicas de las tecnologías disponibles. El CND definirá mediante estudio, análisis y seguimiento posoperativo, los parámetros de ganancia y constantes de tiempo para cumplir con criterios de estabilidad, velocidad de respuesta del SIN.
- Cumplir con los siguientes parámetros: tiempo de respuesta inicial máximo (Tr) de 2 segundos y tiempo de establecimiento máximo (Te) de 15 segundos.
- El CND dentro de los rangos establecidos, definirá el valor de estatismo y banda muerta de acuerdo con las necesidades del SIN.

Las plantas eólicas y solares fotovoltaicas conectadas al STN y STR deben estar en capacidad de prestar el servicio de regulación primaria para eventos de sobrefrecuencia y subfrecuencia. Para ser declaradas en operación comercial, deben realizar pruebas de respuesta primaria ante eventos de sobrefrecuencia y subfrecuencia.

Según lo establecido en el artículo 15 de la resolución CREG 060 de 2019 [1]:

- Las plantas eólicas y solares fotovoltaicas, conectadas al STN y STR, deben tener una rampa operativa para arranque y parada ajustable. Inicialmente se define una rampa máxima del 14 % de la potencia nominal de la planta, en MW/min, para lo cual:
 - Este requerimiento de arranque y parada aplica siempre que esté disponible el recurso primario de generación.
 - El agente debe reportar la rampa máxima de la planta.
 - Este parámetro debe poder ajustarse dependiendo de las condiciones del sistema, considerando la rampa máxima reportada.

- El valor inicial de la rampa máxima del 14% podrá ser revaluado por el CND, considerando la rampa máxima reportada.

Procedimientos para la ejecución de las pruebas asociadas al control de potencia activa/frecuencia de las plantas solares conectadas en el STR

El Acuerdo C.N.O 1741 [3] establece los procedimientos para llevar a cabo las pruebas del control de potencia activa y frecuencia de las plantas solares conectadas al STR, como es el caso de Sunnorte. Los resultados presentados en este informe se obtienen siguiendo los protocolos definidos en el citado Acuerdo.

5. PRUEBAS DE ESTADISTMO Y TIEMPOS DE ESTABLECIMIENTO

Siguiendo lo establecido en el Anexo del Acuerdo C.N.O 1741 [3] se lleva a cabo la prueba de estadismo y tiempos de establecimiento, utilizando el protocolo 1B para control centralizado de potencia activa/frecuencia.

A través del software interno del PPC se inyectan valores en la señal de frecuencia, de manera que el control de potencia activa/frecuencia observe cambios tipo escalón, en la variable controlada, limitando el efecto de las variaciones de frecuencia del sistema. Las pruebas se llevan a cabo deshabilitando la banda muerta.

La Tabla 2 presenta la descripción general de la prueba, utilizando el formato del Anexo 1 al Acuerdo 1741

Tabla 2. Descripción general prueba de estadismo y tiempo de establecimiento según acuerdo C.N.O 1741

	RESPUESTA	OBSERVACIONES (si se requiere)
REPORTAR EL PROTOCOLO USADO (A O B).	B	Control centralizado
Inyección (Externa, o interna)	Interna	
Banda muerta inhabilitada o ampliada (si, no). En observaciones indicar acción tomada, en caso de ampliación de banda muerta indicar el valor.	Si	Banda muerta inhabilitada
Señal en donde se aplicó el escalón(frecuencia- F- , Referencia de la frecuencia- Fref-)	F	

Tiempo de establecimiento y Tiempo de respuesta inicial (Protocolo 1B, Numeral 3.4)

Se calcula el tiempo de establecimiento y tiempo de respuesta según la definición del Anexo al Acuerdo C.N.O 1741 [3]. Para ello se aplica un escalón ascendente y otro descendente de 0,2 Hz (vistos efectivamente por el sistema de control como perturbación total de frecuencia) a la planta, la cual está despachada con una carga alta.

Se determina el tiempo ante ambos escalones (ascendente y descendente), siendo el tiempo de establecimiento y el tiempo de respuesta inicial el valor máximo de los tiempos obtenidos para el escalón ascendente y descendente.

De acuerdo con los resultados de la prueba, los cuáles se presentan de forma gráfica a continuación, el tiempo de establecimiento y de respuesta inicial es de 5,2195 segundos y 0,44 segundos respectivamente. Este valor cumple con los requerimientos establecidos en la resolución CREG 060 de 2019.

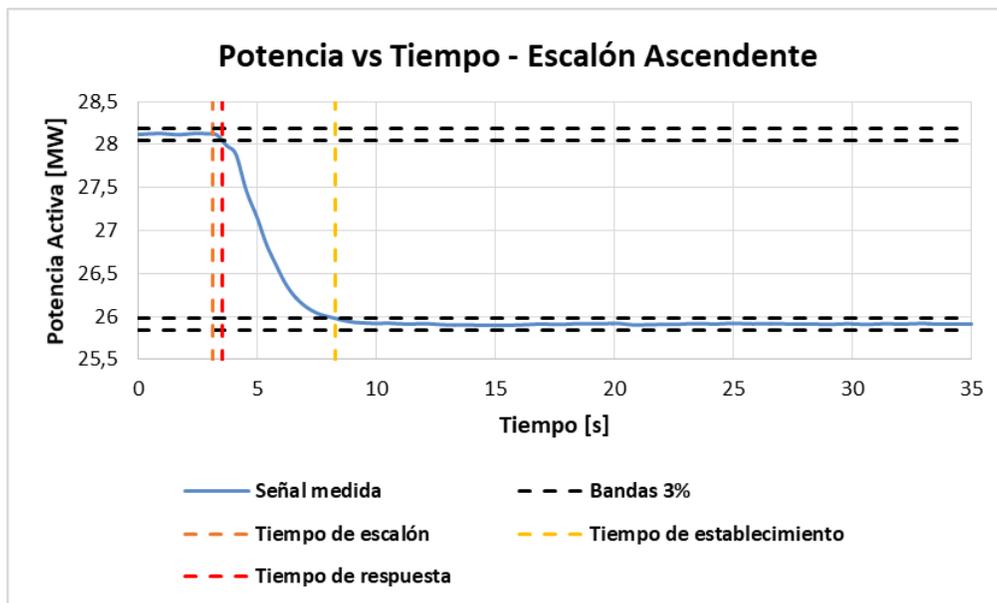


Figura 1. Acuerdo C.N.O 1741 - Cálculo tiempo de establecimiento para escalón ascendente

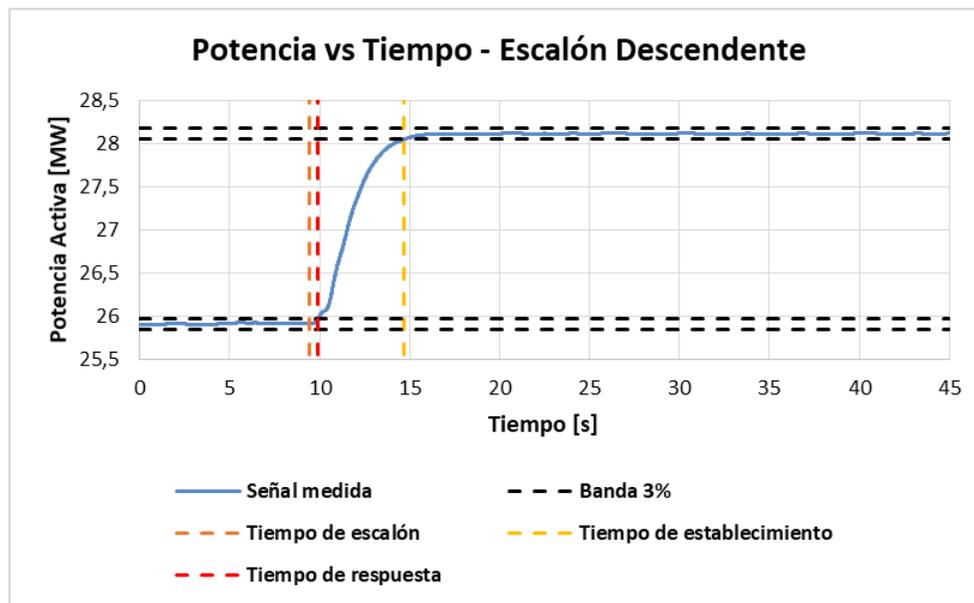


Figura 2. Acuerdo C.N.O 1741 - Cálculo tiempo de establecimiento para escalón descendente

Los registros de las pruebas presentadas en esta sección se reportan en la pestaña “*Tiempo de establecimiento*” del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741.

Estatismo (Protocolo 1B, Numeral 3.5 a 3.7)

Siguiendo lo establecido en el Acuerdo 1741, para el cálculo del estatismo se realizan 9 escalones positivos y negativos de frecuencia de manera secuencial, con un tamaño de incremento/decremento de 200 mHz cada uno. Luego, se realizan 2 escalones positivos y negativos con un incremento/decremento de 200 mHz cada uno, cubriendo al menos el 80% del rango operativo de la planta.

Durante la prueba después de aplicar cada escalón se da una espera de al menos 15 segundos (mayor al tiempo de establecimiento obtenido en el numeral anterior) para determinar los valores finales de las variables analizadas.

Durante la prueba se registran datos de:

- Consigna de referencia de frecuencia
- Frecuencia
- Variación de frecuencia
- Referencia de potencia
- Potencia inicial en el punto de conexión
- Potencia final en el punto de conexión
- Variación de potencia en toda la prueba.

El estatismo en cada escalón se calcula utilizando la ecuación (1) del Anexo al Acuerdo C.N.O 1741 (ver definiciones en Sección 2 de este informe). Así mismo se calcula el tiempo de establecimiento y de respuesta inicial. El valor definitivo de estos parámetros se calcula como el promedio de los valores calculados para todos los escalones realizados.

En la Tabla 3 se presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 1 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La misma tabla se presenta en la pestaña “*Cálculo del estatismo - PA-PB*” del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741.

Tabla 3. Cálculo del estatismo con escalones de frecuencia descendentes según lo establecido en el Anexo al Acuerdo C.N.O 1741

Tipo de escalón	Número del escalón	Fecha y hora	Valor inicial Frecuencia [Hz]	Valor final Frecuencia [Hz]	Valor inicial potencia [MW]	Valor Final potencia [MW]	Potencia de referencia [MW]	Valor inicial frecuencia [Hz]*	Valor Final Frecuencia [Hz]*	Estatismo	Tiempo de est. [s]	Tiempo de resp. [s]
Descendente	1	10/04/2024 9:16	60,2	60	1,0069	3,9042	3,917	60,2	60	4,0267	3,05	0,65
Descendente	2	29/02/2024 12:47	61,8	61,6	2,5463	5,4629	28,8	61,8	61,6	4,0001	4,40	0,38
Descendente	3	29/02/2024 12:47	61,6	61,4	5,4605	8,3772	28,8	61,6	61,4	4,0000	4,45	0,51
Descendente	4	29/02/2024 12:47	61,4	61,2	8,3854	11,3021	28,8	61,4	61,2	4,0000	5,05	0,46
Descendente	5	29/02/2024 12:47	61,2	61	11,3021	13,9537	28,8	61,2	61	4,3999	4,81	0,37
Descendente	6	29/02/2024 12:47	61	60,8	13,9447	16,8614	28,8	61	60,8	4,0000	4,45	0,54
Descendente	7	29/02/2024 12:47	60,8	60,6	16,8612	19,7779	28,8	60,8	60,6	4,0000	4,97	0,51
Descendente	8	29/02/2024 12:48	60,6	60,4	19,7902	22,7069	28,8	60,6	60,4	4,0000	5,10	0,59
Descendente	9	29/02/2024 12:48	60,4	60,2	22,7207	25,6374	28,8	60,4	60,2	4,0000	5,04	0,54
Descendente	10	29/02/2024 12:48	60,2	60	25,6337	28,116	28,8	60,2	60	4,6999	4,48	0,59
Descendente	11	10/04/2024 12:14	60,2	60	26,0840	28,9972	29	60,2	60	4,0047	3,25	0,70
Ascendente	1	10/04/2024 9:17	60	60,2	3,9095	1,01	3,917	60	60,2	4,0253	2,95	0,20
Ascendente	2	29/02/2024 12:51	60	60,2	28,1387	25,64	28,8	60	60,2	4,6691	4,59	0,29
Ascendente	3	29/02/2024 12:51	60,2	60,4	25,6336	22,71	28,8	60,2	60,4	3,9905	4,70	0,35
Ascendente	4	29/02/2024 12:51	60,4	60,6	22,7057	19,78	28,8	60,4	60,6	3,9876	4,77	0,35
Ascendente	5	29/02/2024 12:51	60,6	60,8	19,7863	16,85	28,8	60,6	60,8	3,9733	4,95	0,34
Ascendente	6	29/02/2024 12:51	60,8	61	16,8625	13,94	28,8	60,8	61	3,9920	4,81	0,38
Ascendente	7	29/02/2024 12:51	61	61,2	13,9378	11,31	28,8	61	61,2	4,4397	5,03	0,31
Ascendente	8	29/02/2024 12:52	61,2	61,4	11,3053	8,39	28,8	61,2	61,4	4,0019	4,63	0,32
Ascendente	9	29/02/2024 12:52	61,4	61,6	8,3821	5,47	28,8	61,4	61,6	4,0063	4,52	0,32
Ascendente	10	29/02/2024 12:52	61,6	61,8	5,4626	2,55	28,8	61,6	61,8	4,0056	4,75	0,30
Ascendente	11	10/04/2024 12:16	60	60,2	29,0043	26,11	29	60	60,2	4,0346	3,00	0,45
Valores promedio										4,1026	4,44	0,43

*Estos valores podrán ser iguales a los de las columnas 4 y 5 en caso de que la variable a modificar sea la Frecuencia.

De los resultados presentados en la Tabla 3 se observa que para la planta se tiene un estatismo promedio del 4% (valor dentro del rango establecido del 2% al 6%), un tiempo de establecimiento promedio de 4,75 segundos y un tiempo de repuesta inicial promedio de 0,414 segundos. Estos valores cumplen con los requerimientos establecidos en la resolución CREG 060 de 2019.

Las figuras de abajo presentan de forma gráfica los resultados obtenidos en las pruebas. En la pestaña “Gráficas cálculo est.4% DESC” y “Gráficas cálculo est.4% ASC” del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741 se presentan todas las gráficas y registros asociados a las pruebas de esta sección.

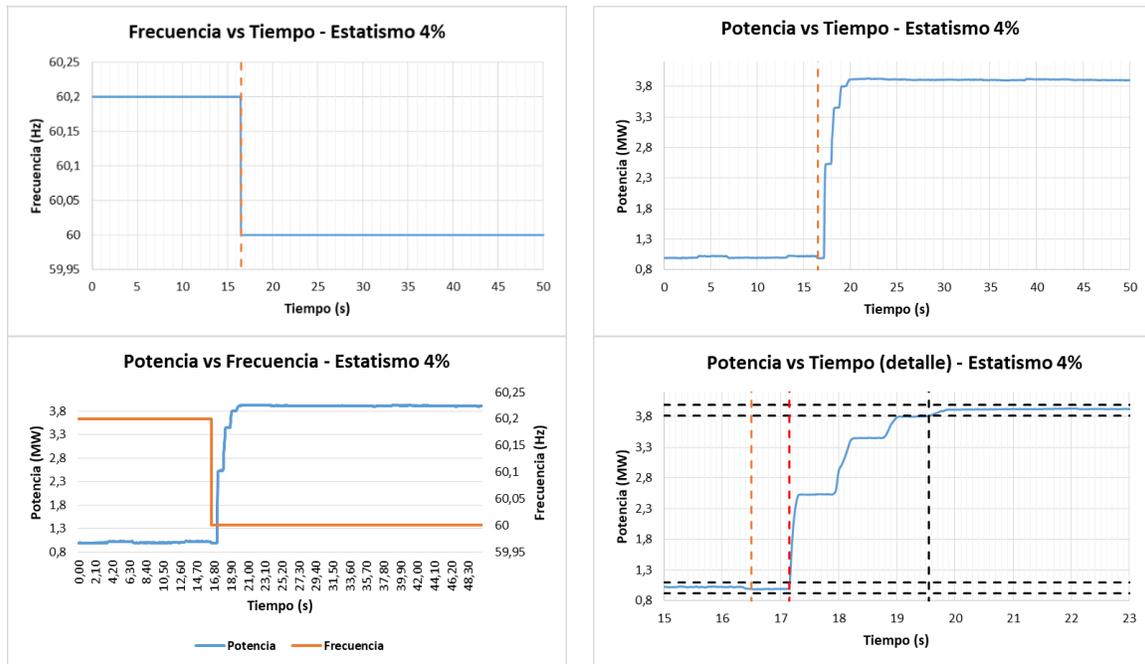


Figura 3. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 1

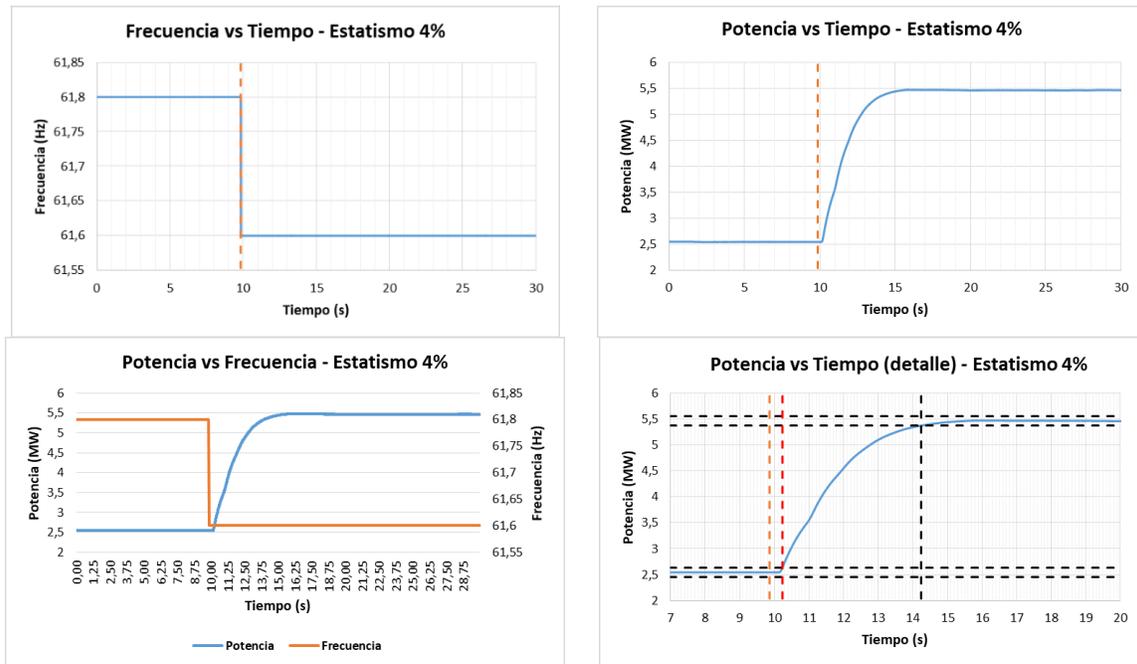


Figura 4. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 2

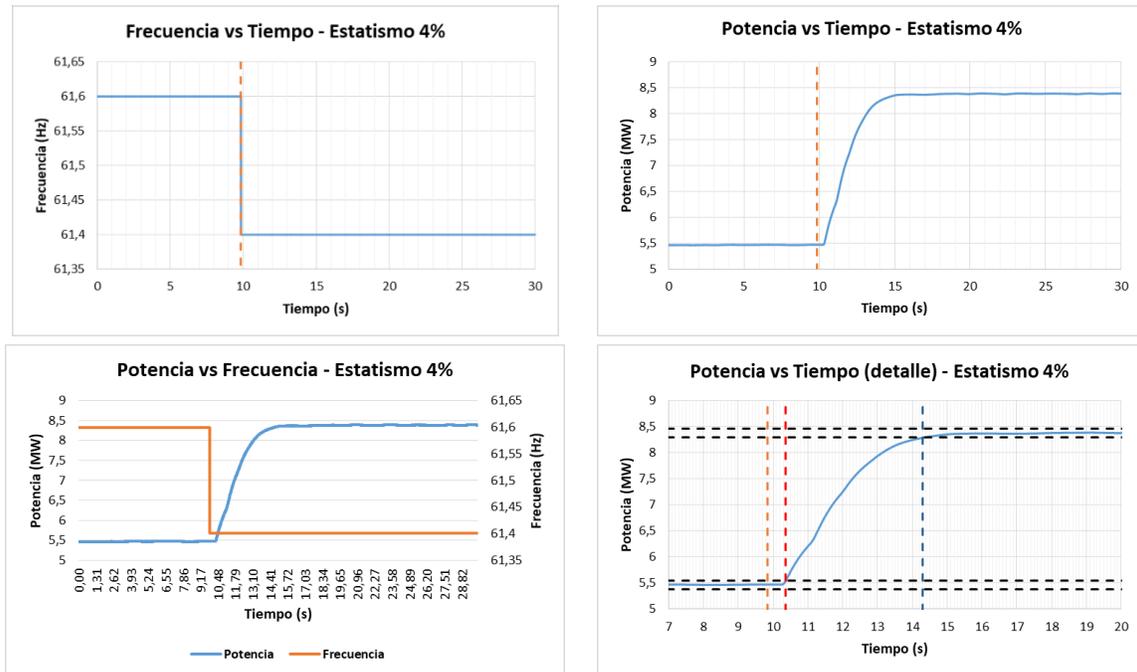


Figura 5. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 3

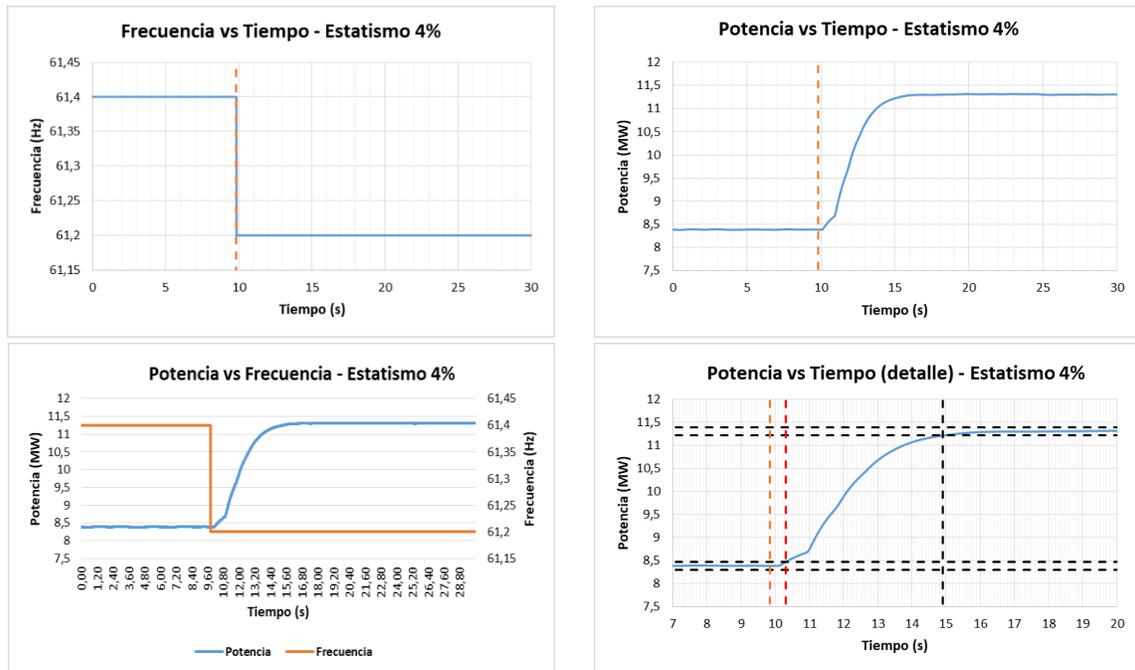


Figura 6. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 4

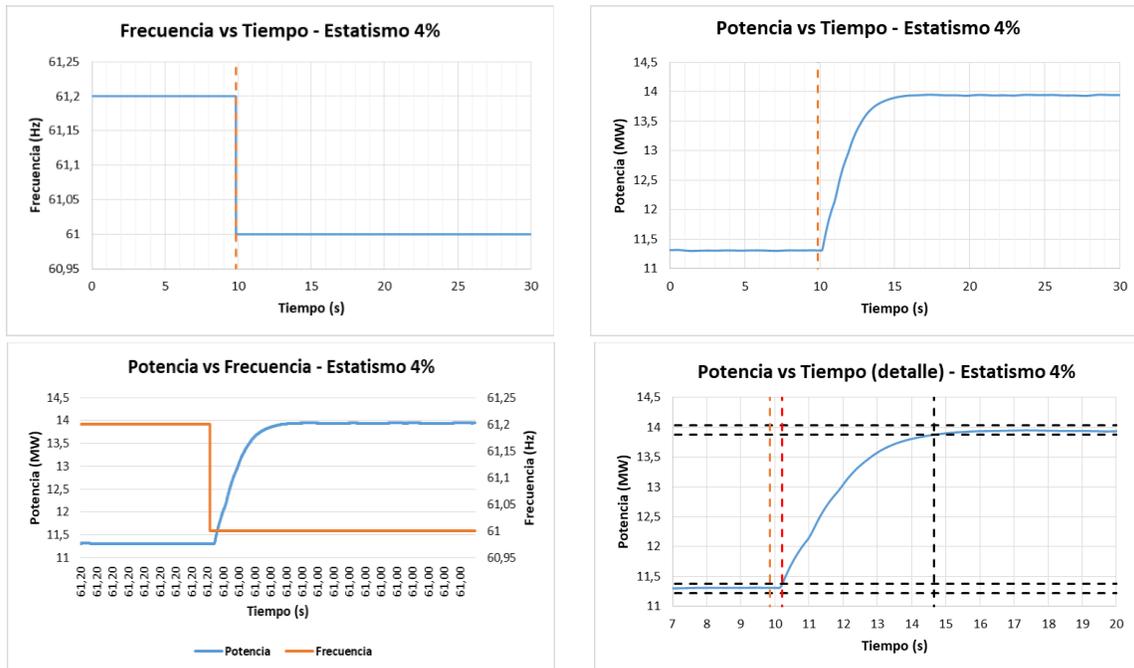


Figura 7. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 5

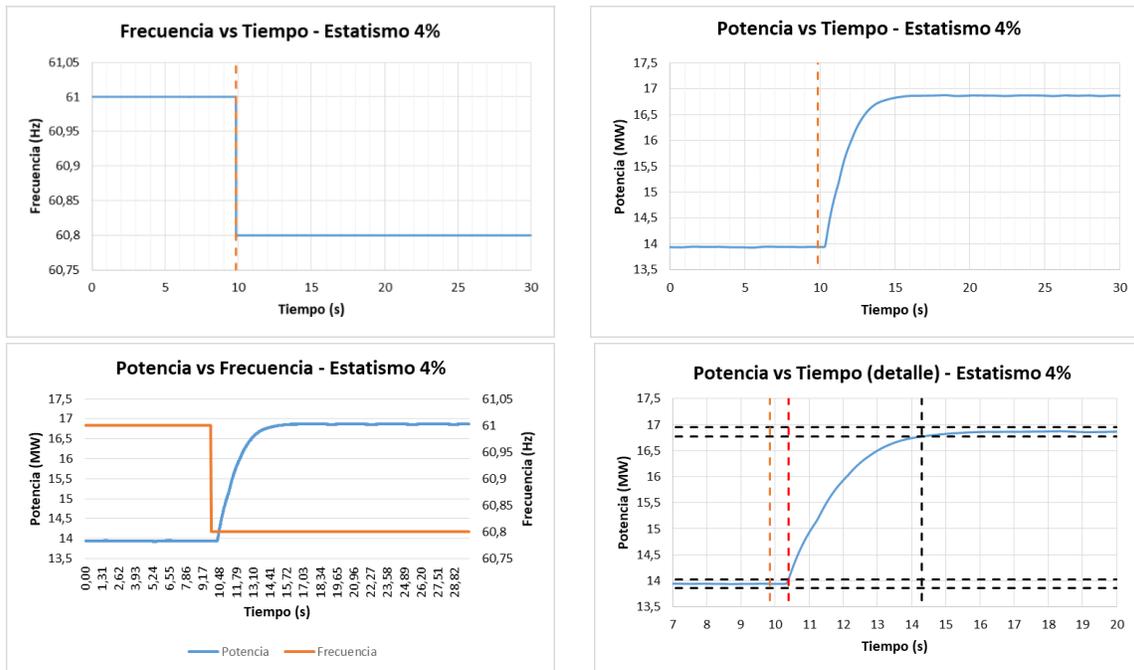


Figura 8. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones negativos – Escalón 6

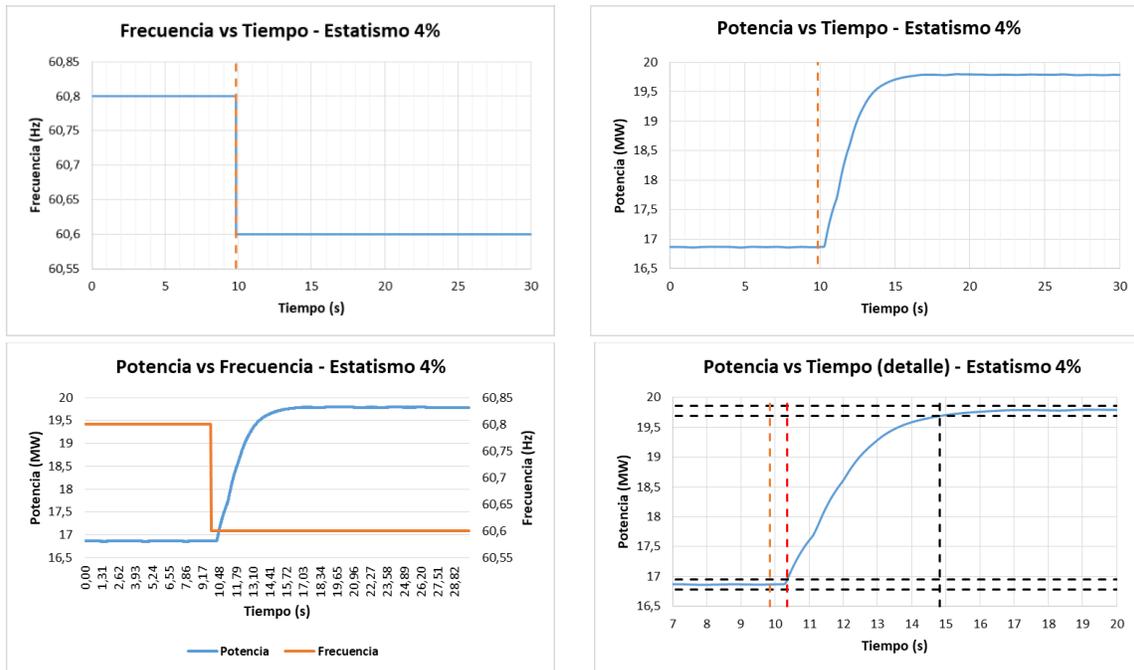


Figura 9. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones negativos – Escalón 7

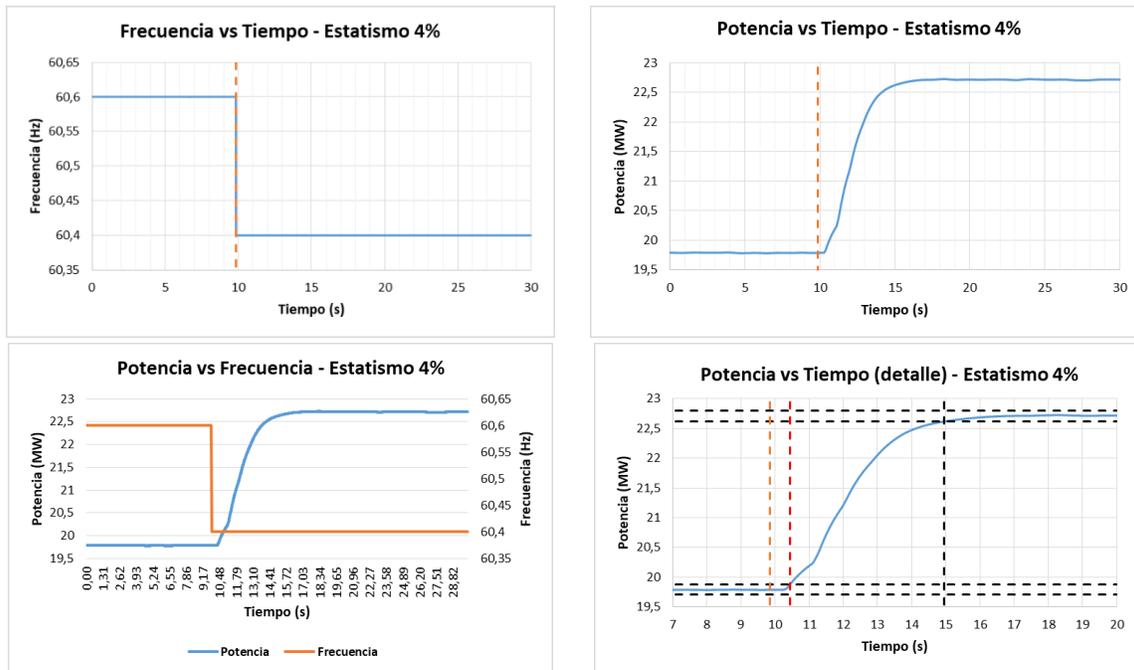


Figura 10. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones negativos – Escalón 8

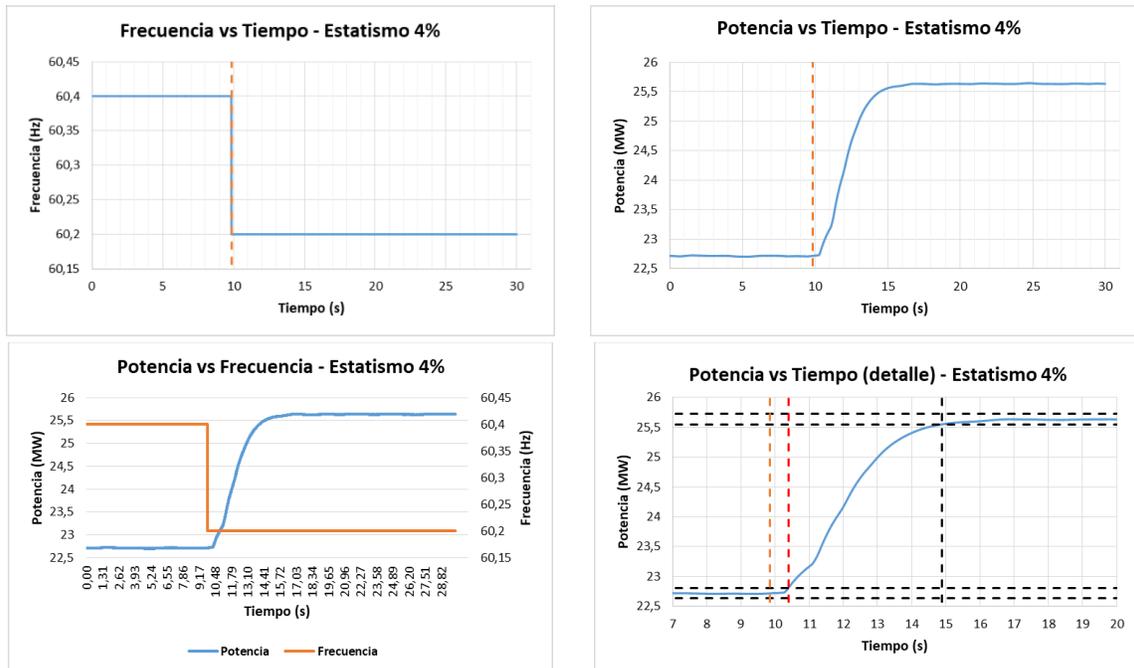


Figura 11. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones negativos – Escalón 9

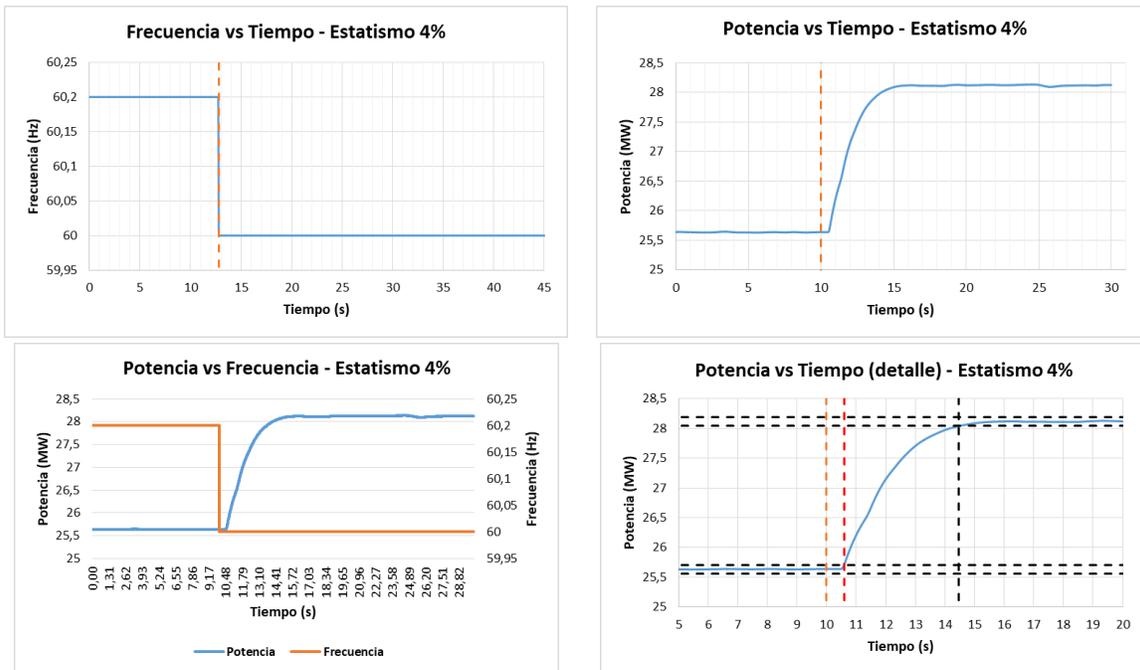


Figura 12. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 10

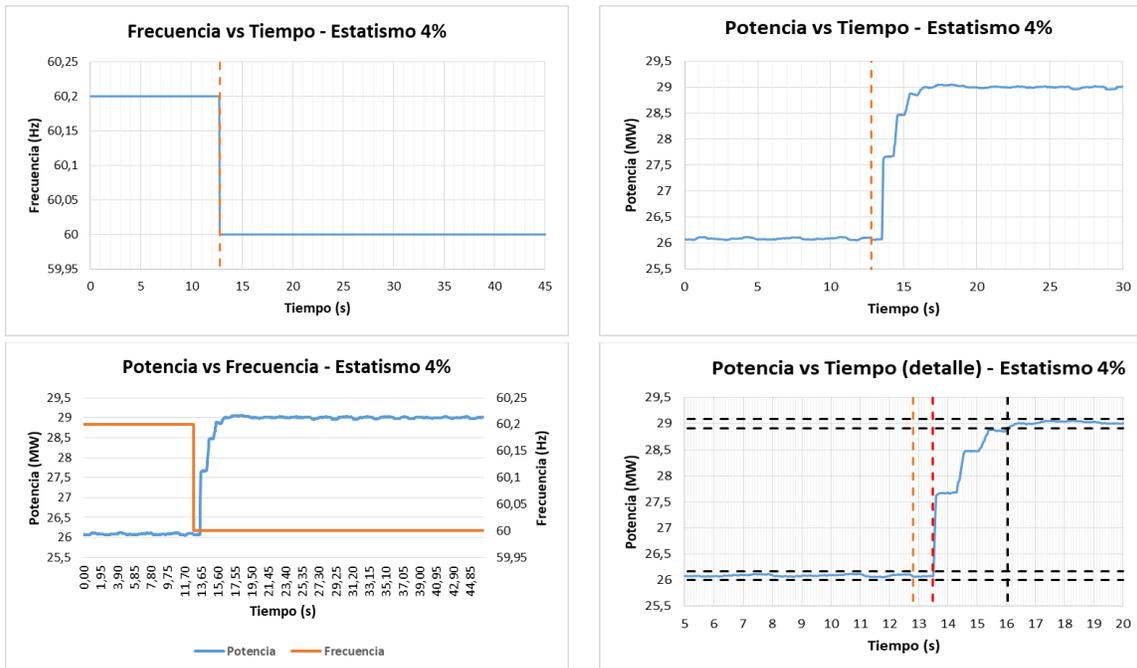


Figura 13. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones negativos – Escalón 11

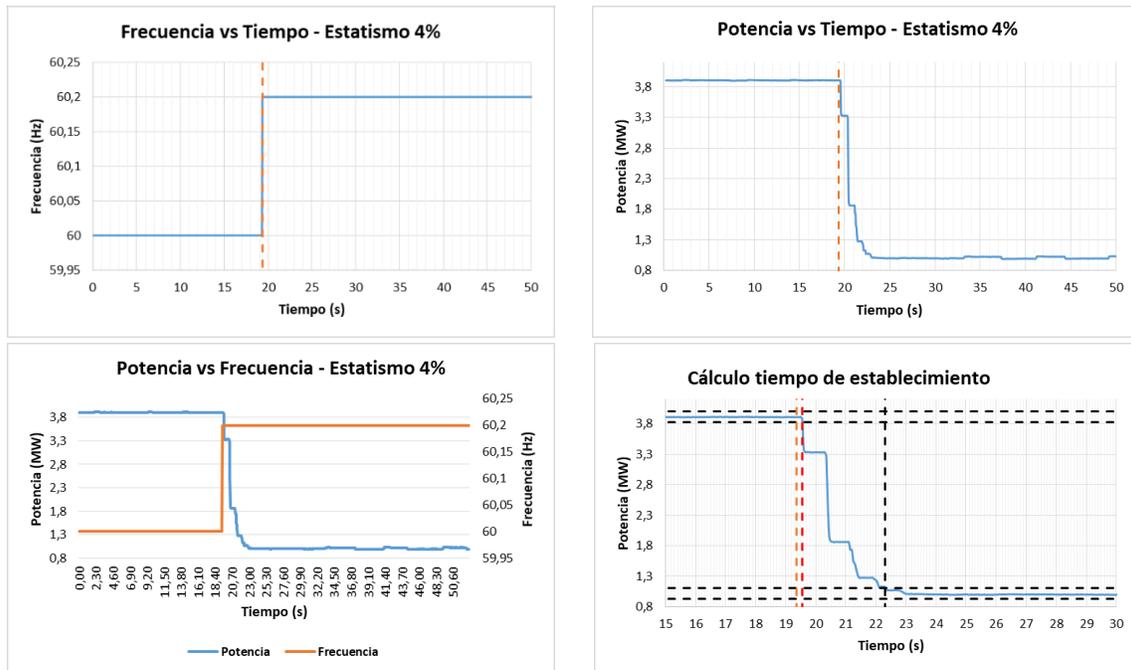


Figura 14. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 1

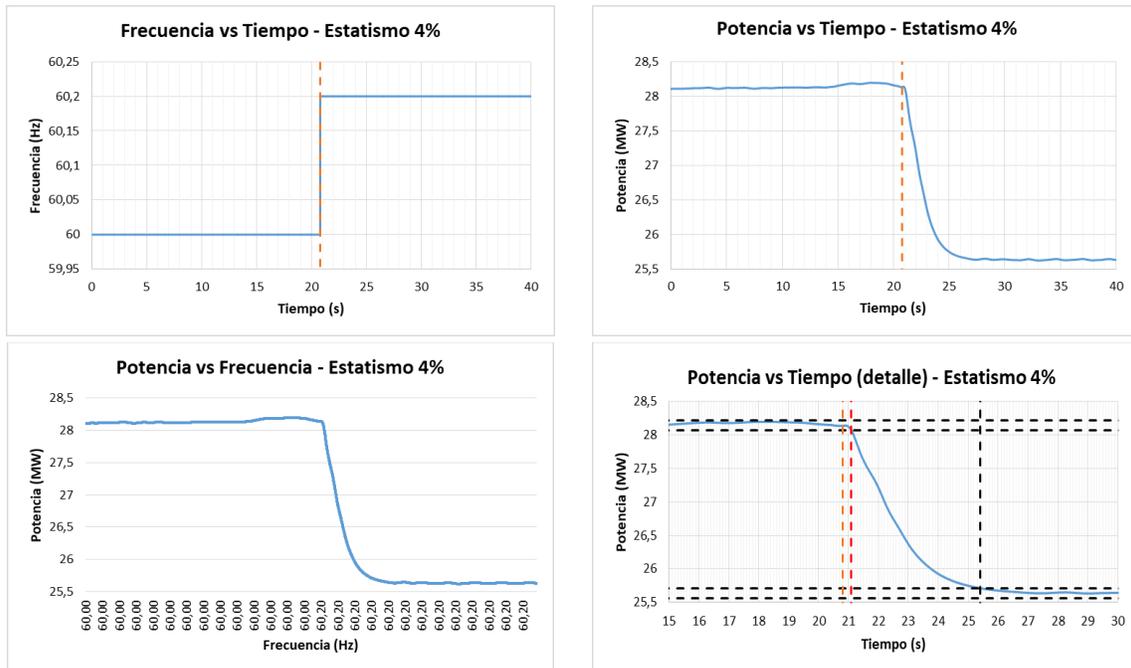


Figura 15. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 2

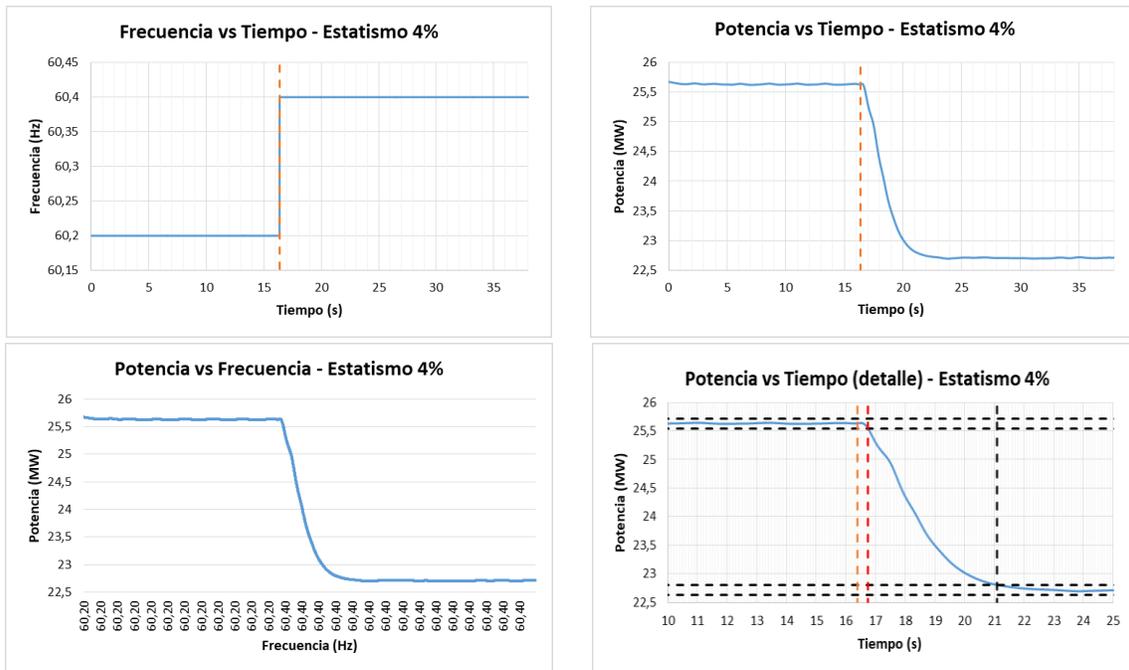


Figura 16. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 3

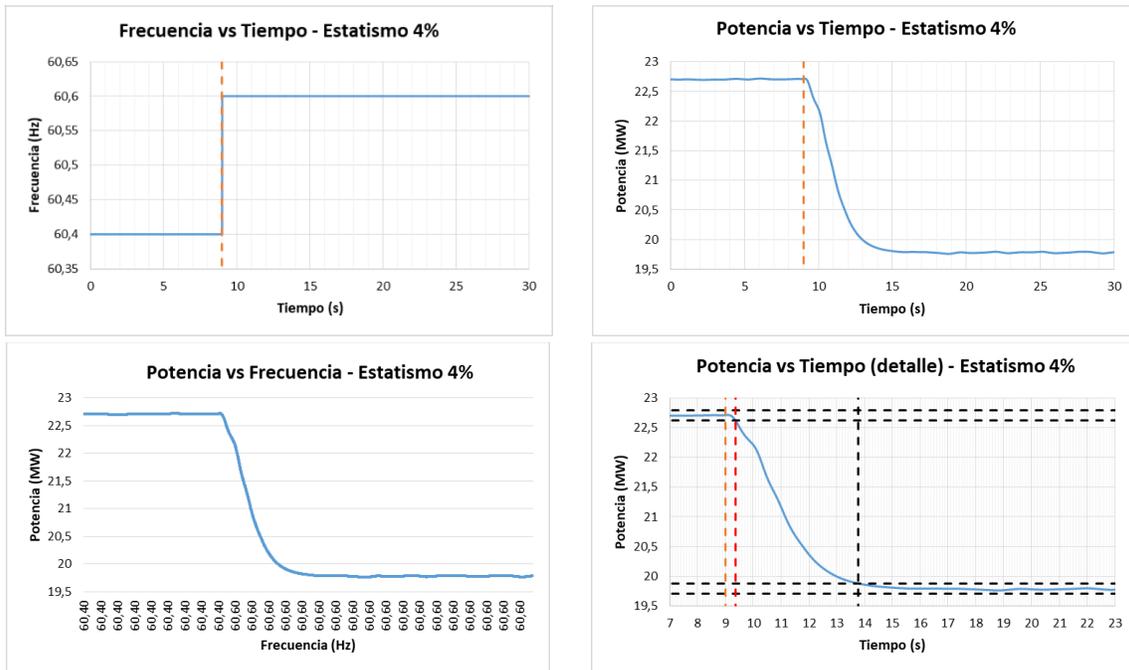


Figura 17. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 4

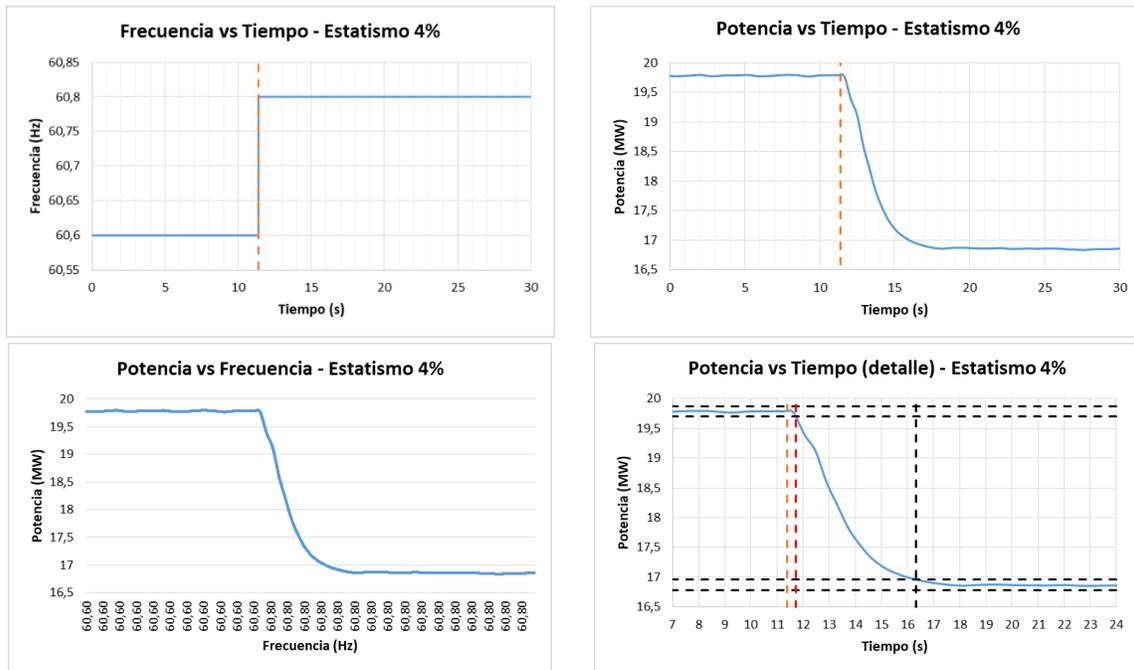


Figura 18. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 5

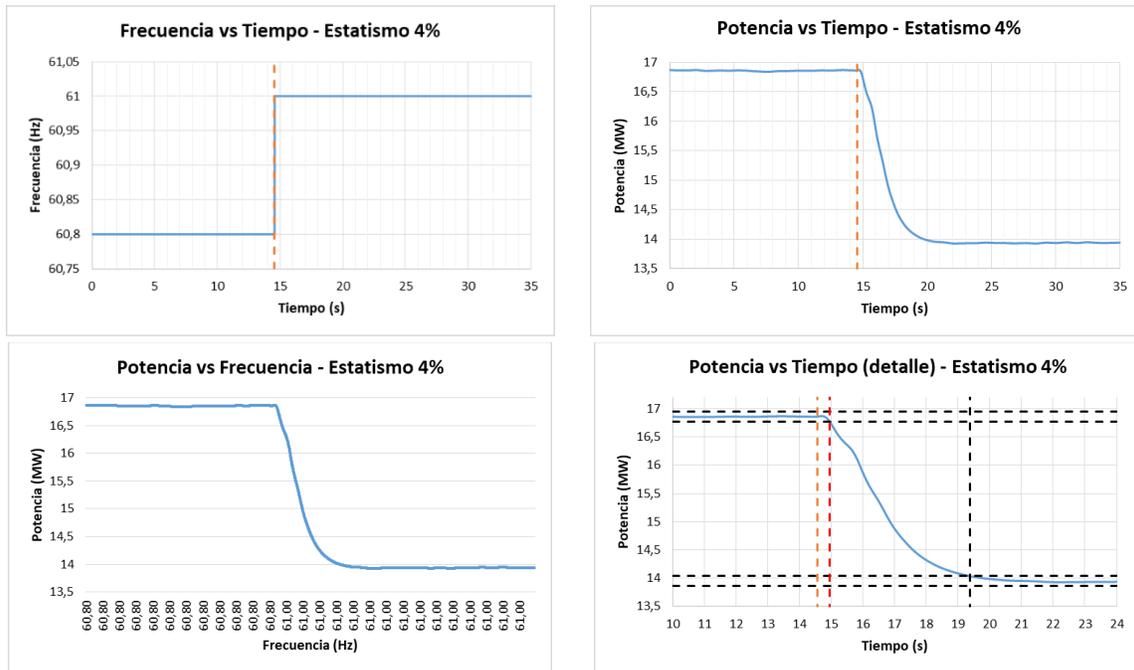


Figura 19. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 6

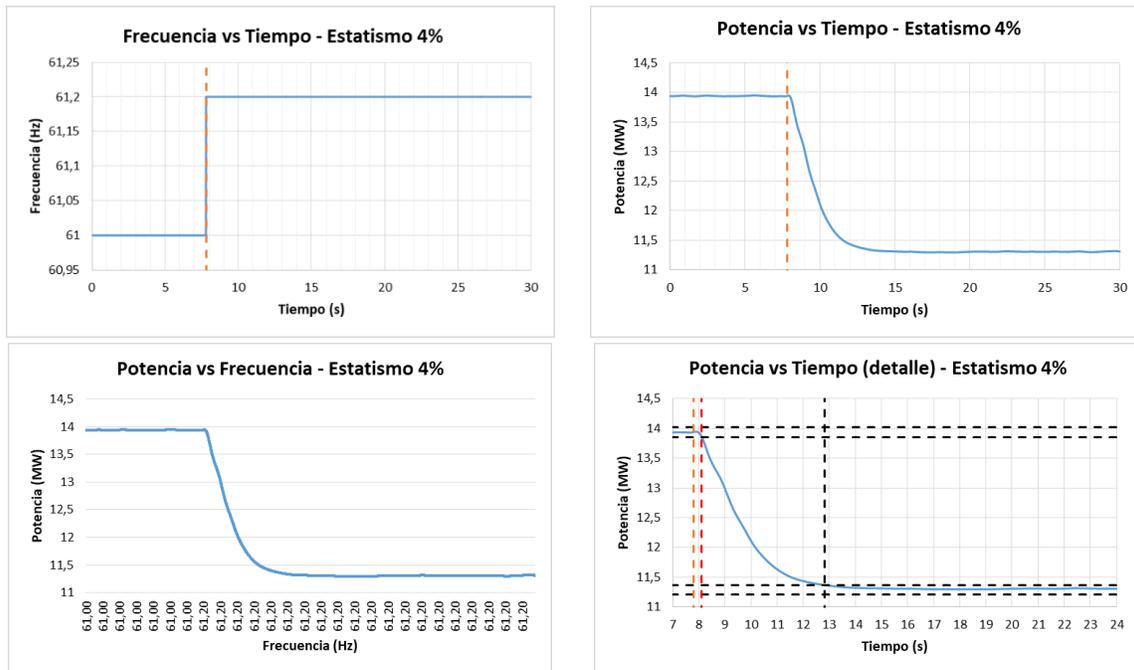


Figura 20. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones positivos – Escalón 7

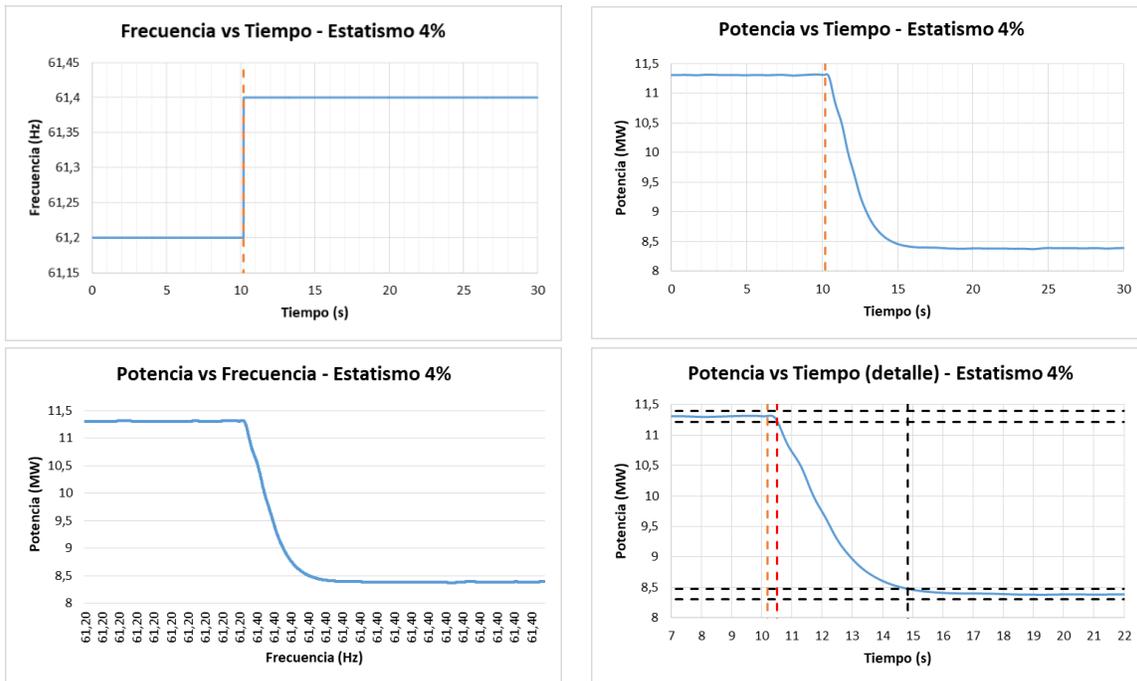


Figura 21. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones positivos – Escalón 8

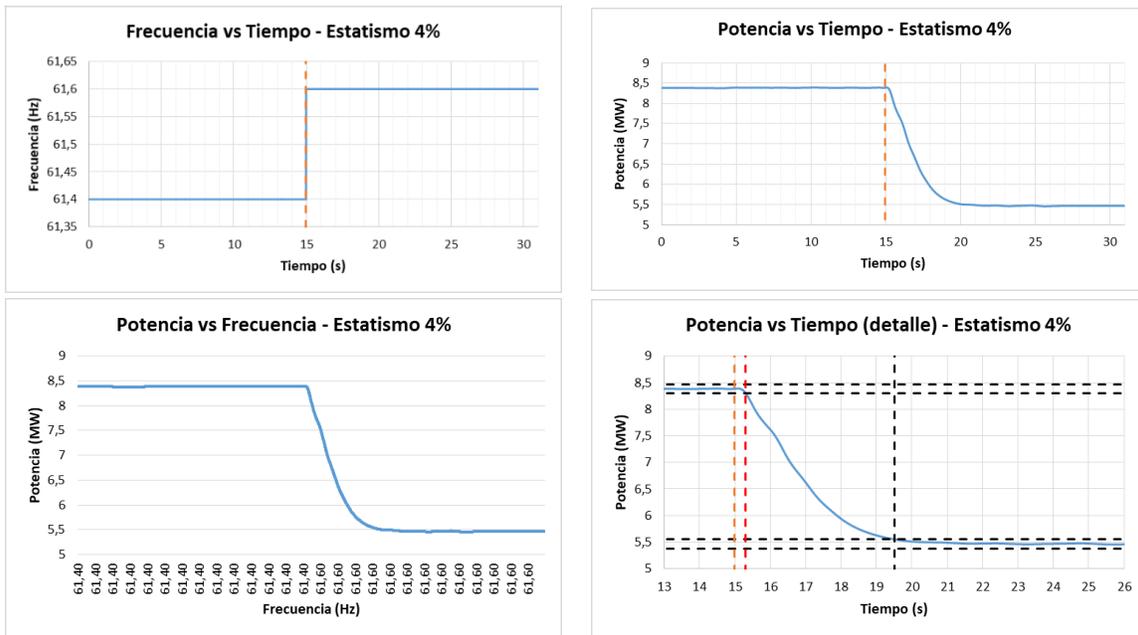


Figura 22. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 9

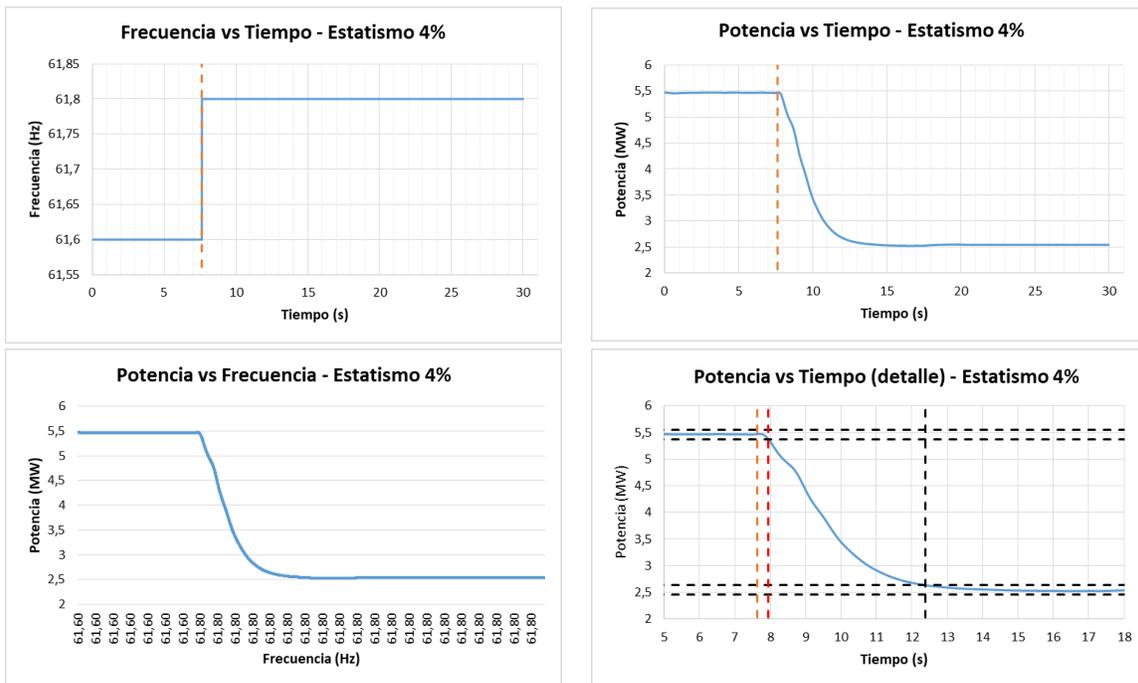


Figura 23. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estadismo - escalones positivos – Escalón 10

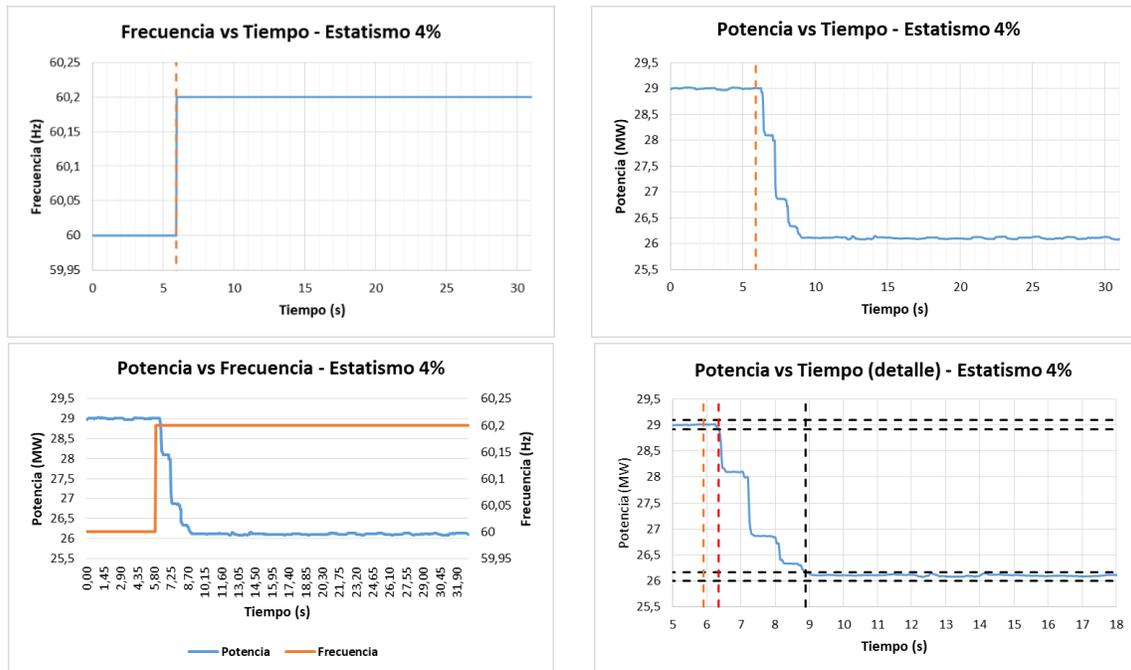


Figura 24. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba estatismo - escalones positivos – Escalón 11

Para cada una de las figuras, la línea vertical naranja indica el tiempo en el que aplicó el escalón, la línea vertical roja indica el tiempo en el que la señal de potencia activa sale de las bandas del 3% alrededor del valor inicial (relacionadas con el tiempo de respuesta T_r) y la línea vertical negra indica el tiempo en el que la señal de potencia activa sale de las bandas del 3% alrededor del valor final (asociada con el tiempo de establecimiento T_e).

Valor máximo rango del estatismo configurable (Protocolo 1B, Numeral 3.8)

Según lo establecido en la resolución CREG 060 de 2019, el estatismo debe ser configurable en un rango entre el 2% y el 6%. Para verificar el valor máximo del rango configurable (6%), se realizan dos escalones ascendentes y dos escalones descendentes de 0,2 Hz sobre el control a nivel de la planta, como lo indica el Anexo al Acuerdo C.N.O 1741.

Durante la prueba después de aplicar cada escalón se da una espera de al menos 20 segundos (mayor al tiempo de establecimiento obtenido) para determinar los valores finales de las variables analizadas.

Para las pruebas se utiliza una frecuencia de referencia de 60 Hz (valor constante durante toda la prueba) y una potencia de referencia (setpoint) de 7 MW (valor constante durante toda la prueba).

Durante la prueba se registran datos de:

- Consigna de referencia de frecuencia
- Frecuencia
- Variación de frecuencia
- Referencia de potencia
- Potencia inicial en el punto de conexión
- Potencia final en el punto de conexión
- Variación de potencia en toda la prueba.

El estadismo en cada escalón se calcula utilizando la ecuación (1) del Anexo al Acuerdo C.N.O 1741 (ver Sección 2 de definiciones de este informe). Así mismo se calcula el tiempo de establecimiento y de respuesta inicial de acuerdo con las definiciones del anexo del Acuerdo 1741. El valor definitivo de estos parámetros se calcula como el promedio de los valores calculados para todos los escalones realizados.

Como se especifica en la sección 5, las pruebas se llevan a cabo deshabilitando la banda muerta y controlando con el software interno del PPC la señal de la frecuencia.

La Tabla 4 presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 1 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La misma tabla se presenta en la pestaña “*Estatismo Rango 6%*”, del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741. Como se observa de la Tabla 4, los resultados de la prueba demuestran que el estadismo de la planta se puede configurar con un valor del 6%, el cual corresponde al valor extremo máximo definido en la resolución CREG 060 de 2019.

Tabla 4. Resultados prueba estatismo configurable al 6%

Tipo de escalón	Número del escalón	Fecha y hora	Valor inicial Frecuencia [Hz]	Valor final Frecuencia [Hz]	Valor inicial potencia [MW]	Valor Final potencia [MW]	Potencia de referencia [MW]	Valor inicial frecuencia [Hz]*	Valor Final Frecuencia [Hz]*	Estatismo	Tiempo de est. [s]	Tiempo de resp. [s]
Descendente	1	08/02/2024 11:05	60	59,8	7,00	8,94	7	60,00	59,80	6,0114	3,25	0,55
Descendente	2	08/02/2024 11:05	59,8	59,6	8,95	10,88	7	59,80	59,60	6,0170	4,25	1,00
Ascendente	3	08/02/2024 11:06	59,6	59,8	10,89	8,95	7	59,60	59,80	6,0085	3,75	0,60
Ascendente	4	08/02/2024 11:06	59,8	60	8,94	7,00	7	59,80	60,00	6,0084	2,90	0,95
Valores promedio										6,0113	3,54	0,77

*Estos valores podrán ser iguales a los de las columnas 4 y 5 en caso de que la variable a modificar sea la Frecuencia.

De la Figura 25 a la Figura 28 se presenta de forma gráfica los resultados de la prueba. Las gráficas que componen las figuras mostradas, así como los cálculos del estadismo y los tiempos de respuesta inicial y de establecimiento a partir de los datos obtenidos se presentan en la pestaña “Gráficas cálculo estadismo 6%”, del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741. En las gráficas, la línea vertical naranja representa el tiempo en el que se aplica el escalón, la línea vertical roja el tiempo en que la señal de potencia activa sale de la banda del 3% alrededor del valor inicial (asociado al T_r) y la línea vertical negra el tiempo en que la señal de potencia activa entra en la banda del 3% alrededor del valor final esperado (asociado al T_e).

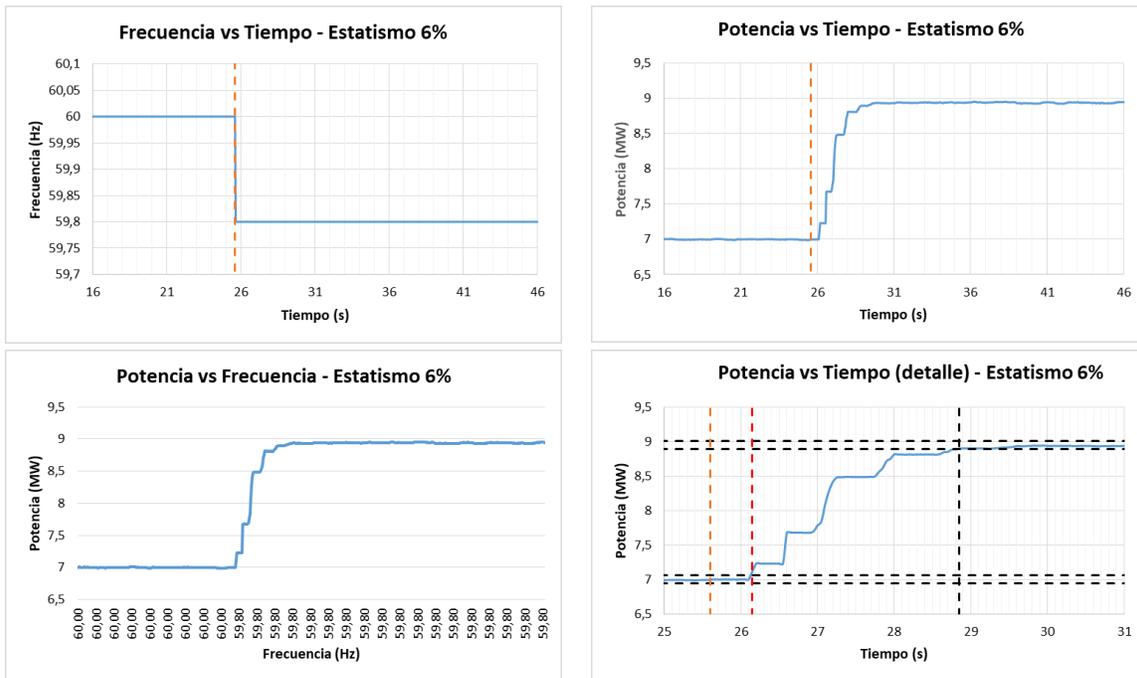
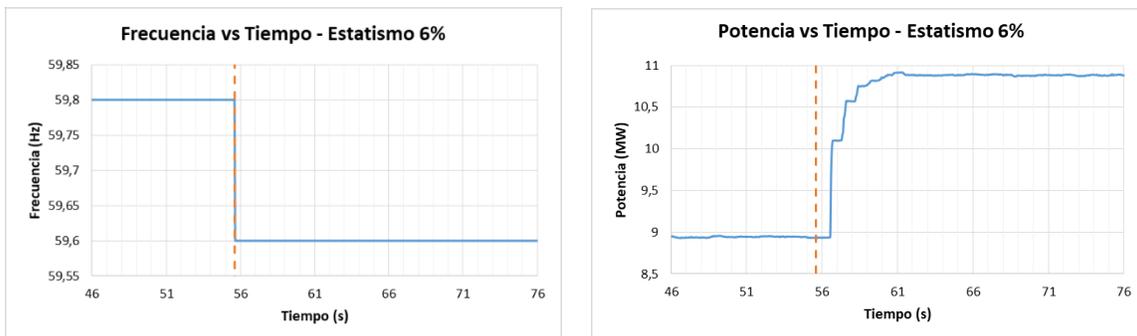


Figura 25. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadismo valor máximo (6%) - Escalón negativo 1



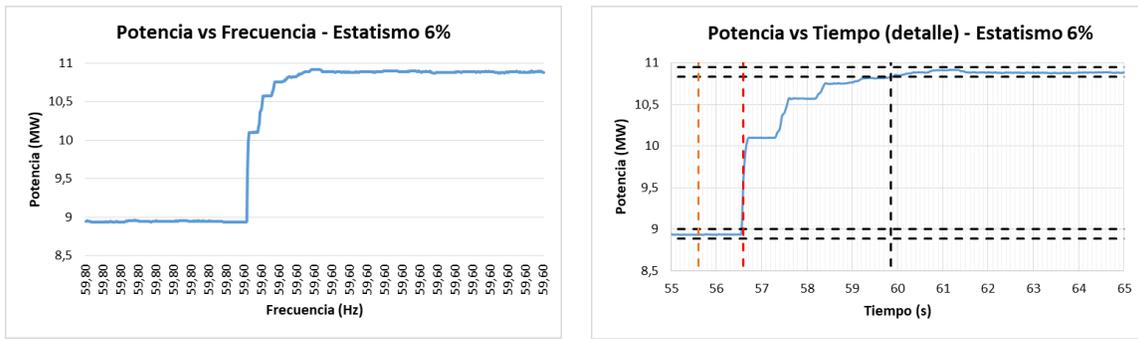


Figura 26. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadismo valor máximo (6%) - Escalón negativo 2

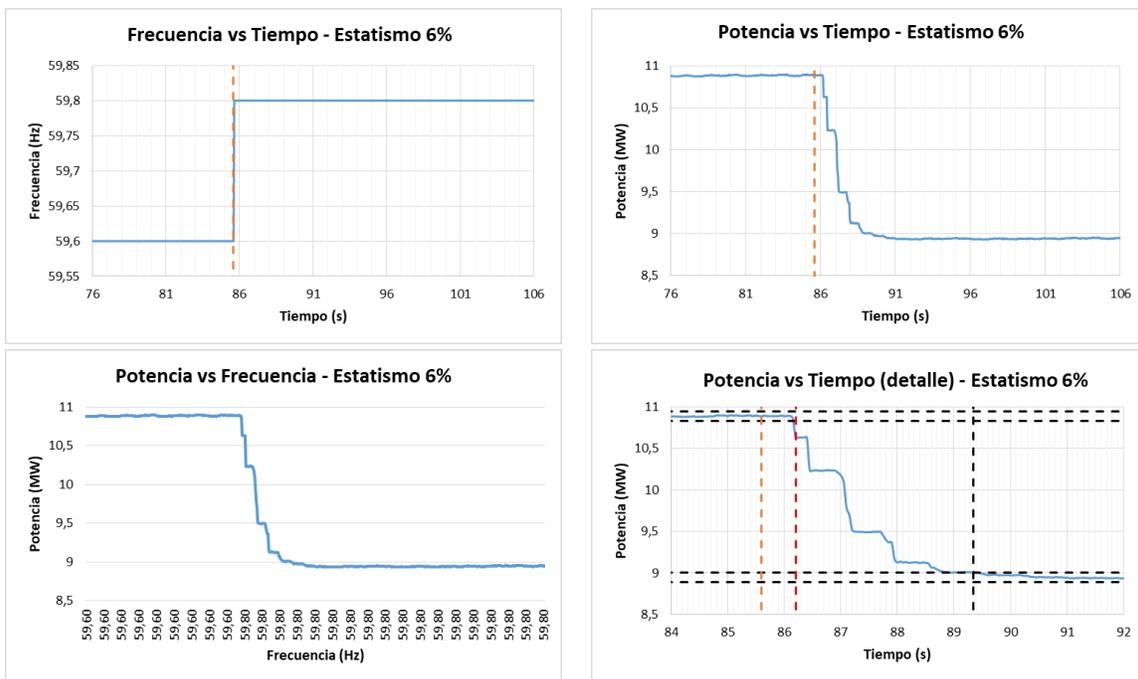


Figura 27. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadismo valor máximo (6%) - Escalón positivo 1

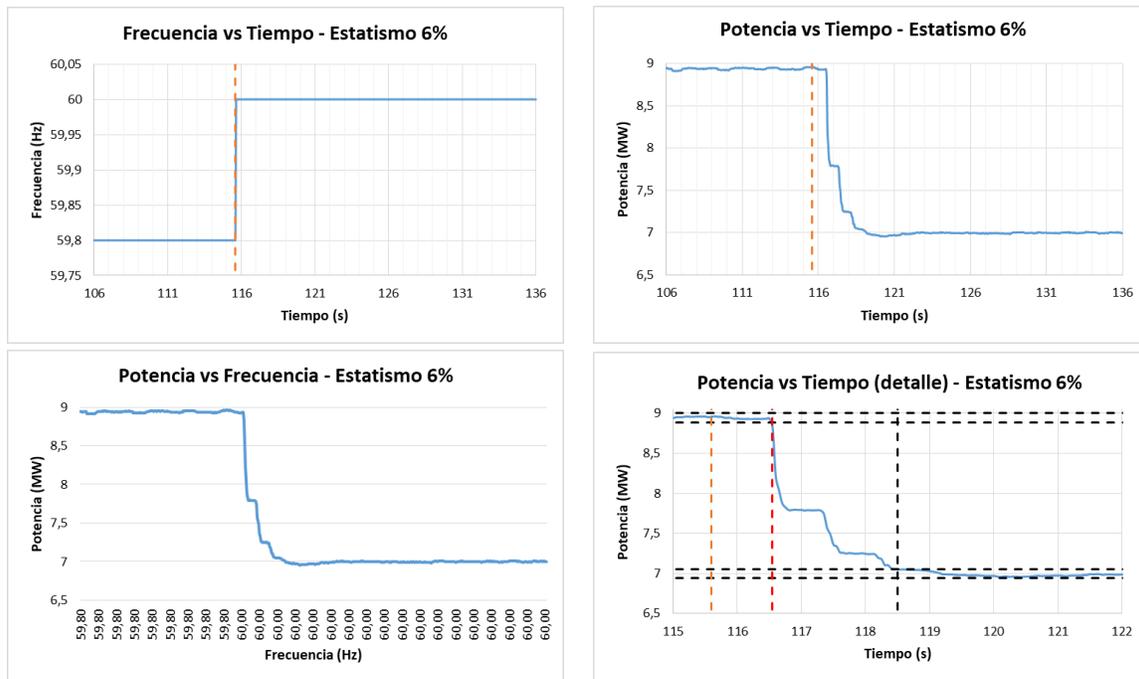


Figura 28. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estatismo valor máximo (6%) - Escalón positivo 2

Valor mínimo rango del estatismo configurable (Protocolo 1B, Numeral 3.8)

Según lo establecido en la resolución CREG 060 de 2019, el estatismo debe ser configurable en un rango entre el 2% y el 6%. Para verificar el valor mínimo del rango configurable (2%), se realizan dos escalones ascendentes y dos escalones descendentes de 0,2 Hz sobre el control a nivel de la planta, como lo indica el Anexo al Acuerdo C.N.O 1741.

Durante la prueba después de aplicar cada escalón se da una espera de al menos 20 segundos (mayor al tiempo de establecimiento obtenido) para determinar los valores finales de las variables analizadas.

Para las pruebas se utiliza una frecuencia de referencia de 60 Hz (valor constante durante toda la prueba) y una potencia de referencia (setpoint) de 7 MW (valor constante durante toda la prueba).

Durante la prueba se registran datos de:

- Consigna de referencia de frecuencia
- Frecuencia
- Variación de frecuencia
- Referencia de potencia
- Potencia inicial en el punto de conexión
- Potencia final en el punto de conexión
- Variación de potencia en toda la prueba.

El estatismo en cada escalón se calcula utilizando la ecuación (1) del Anexo al Acuerdo C.N.O 1741 (ver Sección 2 de definiciones de este informe). Así mismo se calcula el tiempo de establecimiento y de respuesta inicial de acuerdo con las definiciones del anexo del Acuerdo 1741. El valor definitivo de estos parámetros se calcula como el promedio de los valores calculados para todos los escalones realizados.

Como se especifica en la sección 5, las pruebas se llevan a cabo deshabilitando la banda muerta y controlando con el software interno del PPC la señal de la frecuencia.

La Tabla 5 presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 1 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La misma tabla se presenta en la pestaña “*Estatismo Rango 2%*”, del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741. Como se observa de la Tabla 5, los resultados de la prueba demuestran que el estatismo de la planta se puede configurar con un valor del 2%, el cual corresponde al valor extremo mínimo definido en la resolución CREG 060 de 2019.

Tabla 5. Resultados prueba estatismo configurable al 2%

Tipo de escalón	Número del escalón	Fecha y hora	Valor inicial Frecuencia [Hz]	Valor final Frecuencia [Hz]	Valor inicial potencia [MW]	Valor Final potencia [MW]	Potencia de referencia [MW]	Valor inicial frecuencia [Hz]*	Valor Final Frecuencia [Hz]*	Estatismo	Tiempo de est. [s]	Tiempo de resp. [s]
Descendente	1	08/02/2024 11:11	60	59,8	7,00	12,82	7	60,00	59,80	2,0035	3,05	0,65
Descendente	2	08/02/2024 11:12	59,8	59,6	12,80	18,60	7	59,80	59,60	2,0115	2,75	1,05
Ascendente	3	08/02/2024 11:12	59,6	59,8	18,61	12,83	7	59,60	59,80	2,0187	5,15	0,65
Ascendente	4	08/02/2024 11:13	59,8	60	12,84	7,00	7	59,80	60,00	1,9984	2,90	1,05
Valores promedio										2,0080	3,46	0,85

*Estos valores podrán ser iguales a los de las columnas 4 y 5 en caso de que la variable a modificar sea la Frecuencia.

De la Figura 29 a la Figura 32 se presenta de forma gráfica los resultados de la prueba. Las gráficas que componen las figuras mostradas, así como los cálculos del estadismo y los tiempos de respuesta inicial y de establecimiento a partir de los datos obtenidos se presentan en la pestaña “Gráficas cálculo estadismo 2%”, del archivo Excel del Anexo 1 al Acuerdo C.N.O 1741. En las gráficas, la línea vertical naranja representa el tiempo en el que se aplica el escalón, la línea vertical roja el tiempo en que la señal de potencia activa sale de la banda del 3% alrededor del valor inicial (asociado al T_r) y la línea vertical negra el tiempo en que la señal de potencia activa entra en la banda del 3% alrededor del valor final esperado (asociado al T_e).

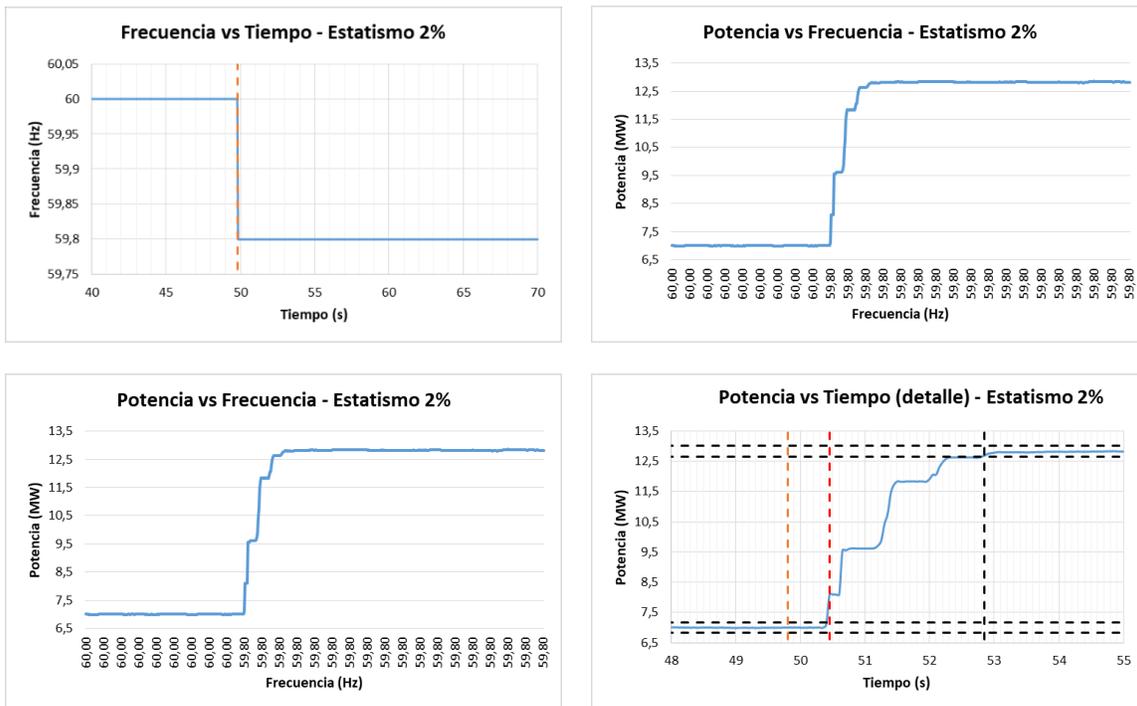
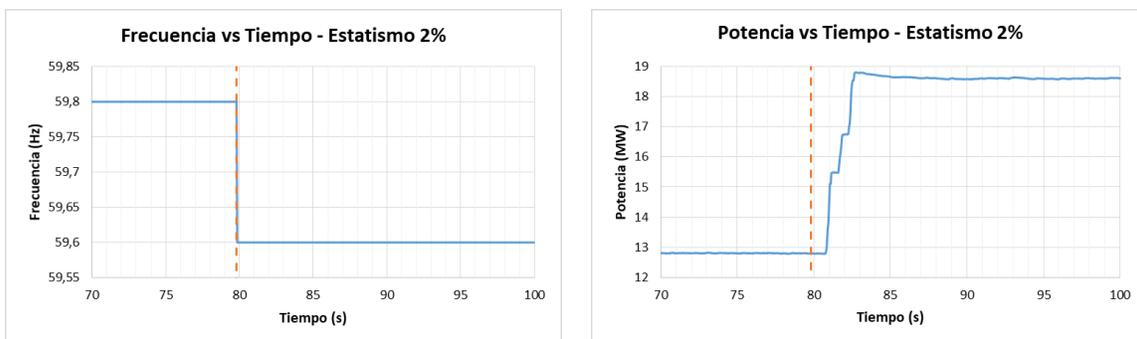


Figura 29. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadismo valor mínimo (2%) - Escalón negativo 1



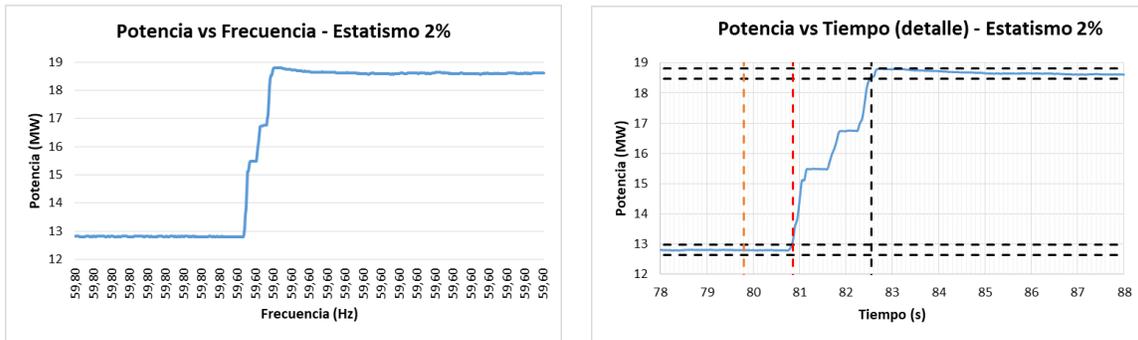


Figura 30. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadismo valor mínimo (2%) - Escalón negativo 2

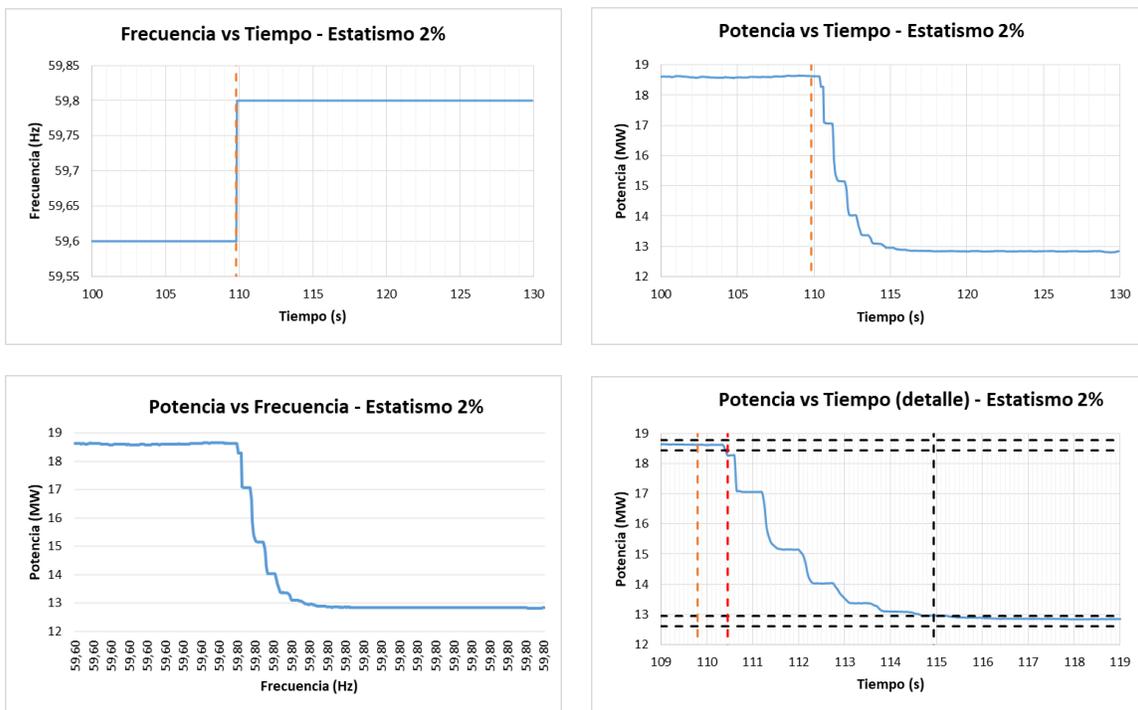


Figura 31. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estadismo valor mínimo (2%) - Escalón positivo 1

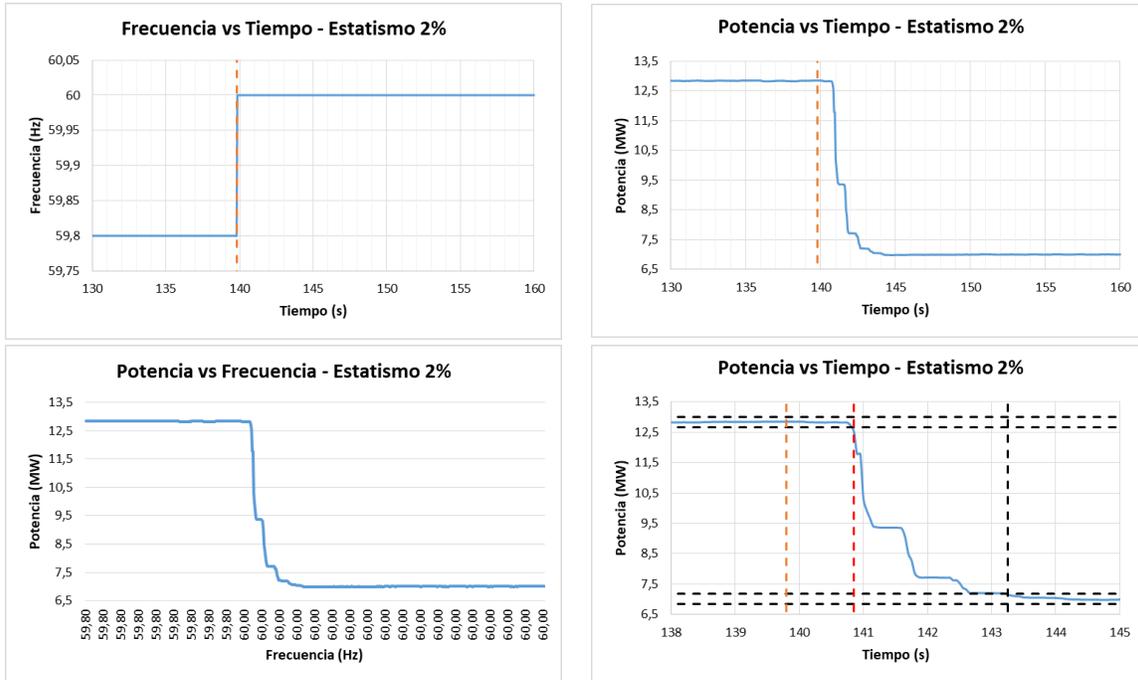


Figura 32. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba estatismo valor mínimo (2%) - Escalón positivo 2

6. PRUEBAS DE BANDA MUERTA

Siguiendo lo establecido en el Anexo del Acuerdo C.N.O 1741 [3] se lleva a cabo la prueba de banda muerta, utilizando el protocolo 1B para control centralizado de potencia activa/frecuencia.

A través del software interno del PPC se inyectan valores en la señal de frecuencia, de manera que el control de potencia activa/frecuencia observe cambios tipo escalón, en la variable controlada (la frecuencia), limitando el efecto de las variaciones de frecuencia del sistema.

La Tabla 6 presenta la descripción general de la prueba, utilizando el formato del Anexo 2 al Acuerdo 1741

Tabla 6. Descripción general prueba de banda muerta según acuerdo C.N.O 1741

	RESPUESTA	OBSERVACIONES (si se requiere)
REPORTAR EL PROTOCOLO USADO (A O B).	B	Control centralizado
Inyección (Externa, o interna)	Interna	
Señal en donde se aplicó el escalón(frecuencia-F- , Referencia de la frecuencia- Fref-)	F	

Banda muerta valor actual +/- 30 MHz (Protocolo 1B, Numeral 3.3 a 3.4)

Para la ejecución de la prueba se siguen los pasos indicados en el numeral 3.3 del protocolo 1B del Anexo al acuerdo C.N.O 1741. La prueba se hace utilizando la secuencia descrita a continuación:

Subfrecuencia

- **Punto 1 dentro de la banda muerta:** Se inyecta un paso de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 60 Hz) para llegar a 59,98 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. Al estar la frecuencia dentro de la banda muerta de +/-30 mHz, no se observa en este caso cambio en la potencia activa.
- **Punto 2 dentro de la banda muerta:** Se inyecta un paso de -0,01 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,98 Hz) para llegar a 59,97 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. Al estar la frecuencia dentro de la banda muerta de +/-30 mHz, no se observa en este caso cambio en la potencia activa.
- **Punto 1 por debajo de la franja inferior:** Se inyecta un paso de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo del límite de la banda muerta desde 59,97 Hz) para llegar a 59,95 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a la banda muerta y el estatismo programado (4 %).
- **Punto 2 por debajo de la franja inferior:** Se inyecta un paso de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,95 Hz) para llegar a 59,93 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a la banda muerta y el estatismo programado (4 %).

Desde 59,93 Hz, se retorna la frecuencia a 60 Hz, la potencia activa retorna al valor de consigna de 10 MW.

Sobrefrecuencia

- **Punto 1 dentro de la banda muerta:** Una vez la frecuencia se estabiliza en 60 Hz, tras la prueba de subfrecuencia, se inyecta un paso de +0,02 Hz (partiendo desde 60 Hz) para llegar a 60,02 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. Al estar la frecuencia dentro de la banda muerta de +/-30 mHz, no se observa en este caso cambio en la potencia activa.
- **Punto 2 dentro de la banda muerta:** Se inyecta un paso de +0,01 Hz en la frecuencia (partiendo desde 60,02 Hz) para llegar a 60,03 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. Al estar la frecuencia dentro de la banda muerta de +/-30 mHz, no se observa en este caso cambio en la potencia activa.

- **Punto 1 por encima de la franja superior:** Se inyecta un paso de +0,02 Hz en la frecuencia (partiendo del límite de la banda muerta desde 60,03 Hz) para llegar a 60,05 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a la banda muerta y el estatismo programado (4 %).
- **Punto 2 por encima de la franja superior** Se inyecta un paso de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 60,05 Hz) para llegar a 60,07 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a la banda muerta y el estatismo programado (4 %).

Desde 60,07 Hz, se retorna la frecuencia a 60 Hz, la potencia activa retorna a su valor de consigna de 10 MW.

La prueba se hace utilizando una potencia activa de referencia (consigna de potencia en el PPC sin considerar control de frecuencia) de 10 MW. El estatismo configurado durante la prueba es el estatismo predeterminado de 4%.

La Tabla 7 resume, en el formato definido en el Anexo 2 del Acuerdo 1741, los resultados de la prueba.

Tabla 7 Resultados prueba Banda Muerta - Caso configuración inicial con 30 mHz

Evento	Número del escalón	Fecha y hora	Valor inicial Frecuencia [Hz]	Valor Final Frecuencia [Hz]	Valor inicial potencia [MW]	Valor Final potencia [MW]	Potencia de referencia [MW]	Valor inicial frecuencia [Hz]*	Valor Final Frecuencia [Hz]*
Escalón dentro de BM	1	2/08/2024 11:30	60	59,98	10,00	9,98	10	60,00	59,98
Escalón dentro de BM	2	2/08/2024 11:30	59,98	59,97	9,98	9,99	10	59,98	59,97
Escalón franja inferior BM	3	2/08/2024 11:30	59,97	59,95	9,99	10,29	10	59,97	59,95
Escalón franja inferior BM	4	2/08/2024 11:30	59,95	59,93	10,29	10,57	10	59,95	59,93
Retorno	5	2/08/2024 11:30	59,93	60	10,57	10,00	10	59,93	60,00
Escalón dentro de BM	1	2/08/2024 11:30	60	60,02	10,00	10,00	10	60,00	60,02
Escalón dentro de BM	2	2/08/2024 11:31	60,02	60,03	10,00	10,00	10	60,02	60,03
Escalón franja superior BM	3	2/08/2024 11:31	60,03	60,05	10,00	9,71	10	60,03	60,05
Escalón franja superior BM	4	2/08/2024 11:31	60,05	60,07	9,71	9,41	10	60,05	60,07
Retorno	5	2/08/2024 11:31	60,07	60	9,41	9,99	10	60,07	60,00

*Estos valores podrán ser iguales a los de las columnas 4 y 5 en caso de que la variable a modificar sea la Frecuencia.

La Figura 33 presenta la variación de la potencia activa en el punto de conexión con respecto a la variación en el tiempo de la frecuencia

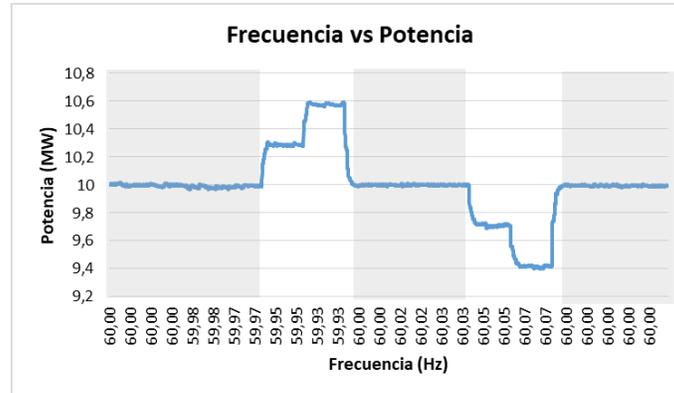


Figura 33. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión

La Figura 34 presenta la variación de la potencia activa en el punto de conexión con respecto a los valores de la frecuencia durante la prueba, ordenando los puntos de acuerdo con el valor de la frecuencia.

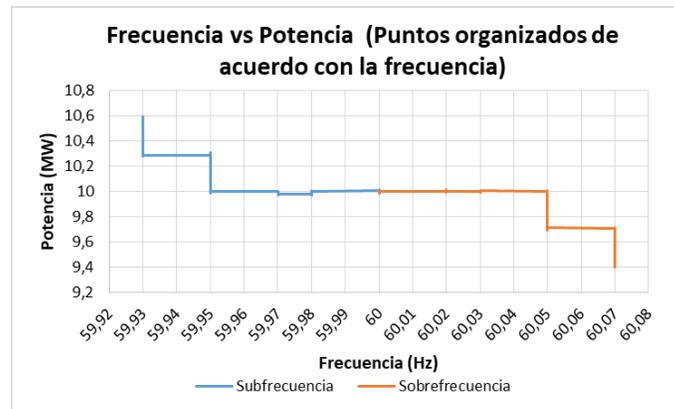


Figura 34. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión

La Figura 35 presenta de forma separada la variación de la potencia activa en el punto de conexión y la variación de la frecuencia con respecto al tiempo, durante la prueba. Como se observa, la variación en contrafase de la potencia activa inicia cuando la frecuencia sale de la banda muerta de 30 mHz.

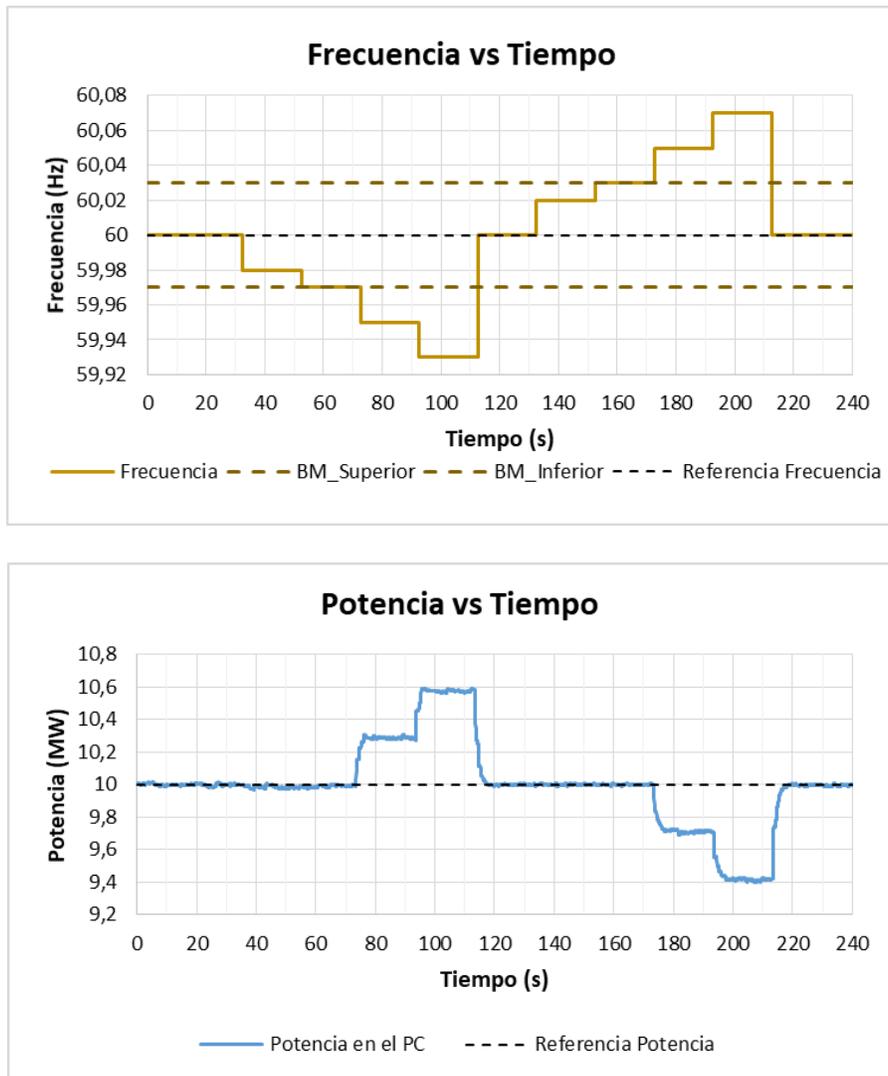


Figura 35. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia vs tiempo (arriba) y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo (abajo)

La Figura 36 presenta en una misma gráfica (con dos ejes verticales) la variación de la potencia activa en el punto de conexión y de la frecuencia con respecto al tiempo. Como se observa, la variación en contrafase de la potencia activa inicia cuando la frecuencia sale de la banda muerta de 30 mHz.

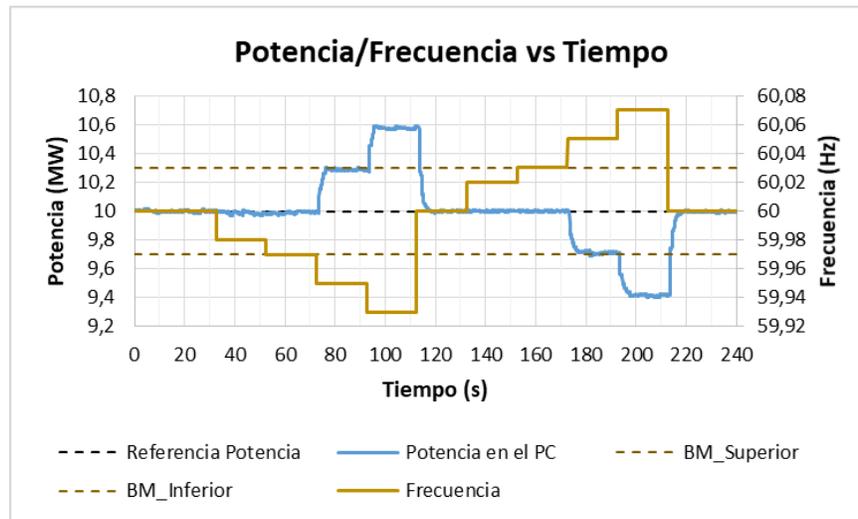


Figura 36. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta caso 30 mHz. Frecuencia y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo

Los resultados de la prueba demuestran que el control se encuentra configurado con una Banda muerta de ± 30 mHz, valor a partir del cual se observa la respuesta a contra fase de la potencia con la variación de la frecuencia. Las gráficas y tablas presentadas en esta sección se entregan en el archivo Excel del Anexo 2 al acuerdo C.N.O 1741, pestañas “Cálculo de la BM - 30 mHz” y “Gráficas cálculo BM 30 mHz”.

Banda muerta valor mínimo 0 MHz (Protocolo 1B, Numeral 3.5)

Para la ejecución de la prueba se siguen los pasos indicados en el numeral 3.5 del protocolo 1B del Anexo al acuerdo C.N.O 1741: “Para verificar el rango configurable para la banda muerta, se deben realizar dos escalones ascendentes y dos escalones descendentes de 0.02 Hz sobre el control a nivel de la planta de generación para el valor mínimo del rango de banda muerta definido en la resolución CREG 060 de 2019 o aquella que la modifique o sustituya”. De acuerdo con lo anterior la prueba se hace utilizando la secuencia descrita a continuación:

- **Escalón de frecuencia descendente 1:** Se inyecta un escalón de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 60 Hz) para llegar a 59,98 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a 60 Hz y el estatismo programado (4 %)
- **Escalón de frecuencia descendente 2:** Se inyecta un escalón de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,98 Hz) para llegar a 59,96 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a 60 Hz y el estatismo programado (4 %)

- **Escalón de frecuencia ascendente 1:** Se inyecta un escalón de +0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,96 Hz) para llegar a 59,98 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a 60 Hz y el estatismo programado (4 %)
- **Escalón de frecuencia ascendente 2:** Se inyecta un escalón de +0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,98 Hz) para retornar a 60 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa retorna al valor de consigna de 10 MW.

La prueba se hace utilizando una potencia activa de referencia (consigna de potencia en el PPC sin considerar control de frecuencia) de 10 MW. El estatismo configurado durante la prueba es el estatismo predeterminado de 4%.

La Tabla 8 resume, en el formato definido en el Anexo 2 del Acuerdo 1741, los resultados de la prueba.

Tabla 8. Resultados prueba Banda Muerta - Caso configuración mínimo con 0 mHz

Evento	Número del escalón	Fecha y hora	Valor inicial Frecuencia [Hz]	Valor Final Frecuencia [Hz]	Valor inicial potencia [MW]	Valor Final potencia [MW]	Potencia de referencia [MW]	Valor inicial frecuencia [Hz]*	Valor Final Frecuencia [Hz]*
Escalón descendente	1	2/08/2024 12:00	60	59,98	10,00	10,30	10,00	60,00	59,98
Escalón descendente	2	2/08/2024 12:00	59,98	59,96	10,30	10,59	10,00	59,98	59,96
Escalón ascendente	3	2/08/2024 12:00	59,96	59,98	10,59	10,30	10,00	59,96	59,98
Escalón ascendente	4	2/08/2024 12:00	59,98	60	10,30	10,00	10,00	59,98	60,00

*Estos valores podrán ser iguales a los de las columnas 4 y 5 en caso de que la variable a modificar sea la Frecuencia.

La Figura 39 presenta de forma separada la variación de la potencia activa en el punto de conexión y la variación de la frecuencia con respecto al tiempo, durante la prueba. Como se observa, la variación en contrafase de la potencia activa inicia cuando la frecuencia es diferente de 60 Hz (banda muerta de 0 mHz).

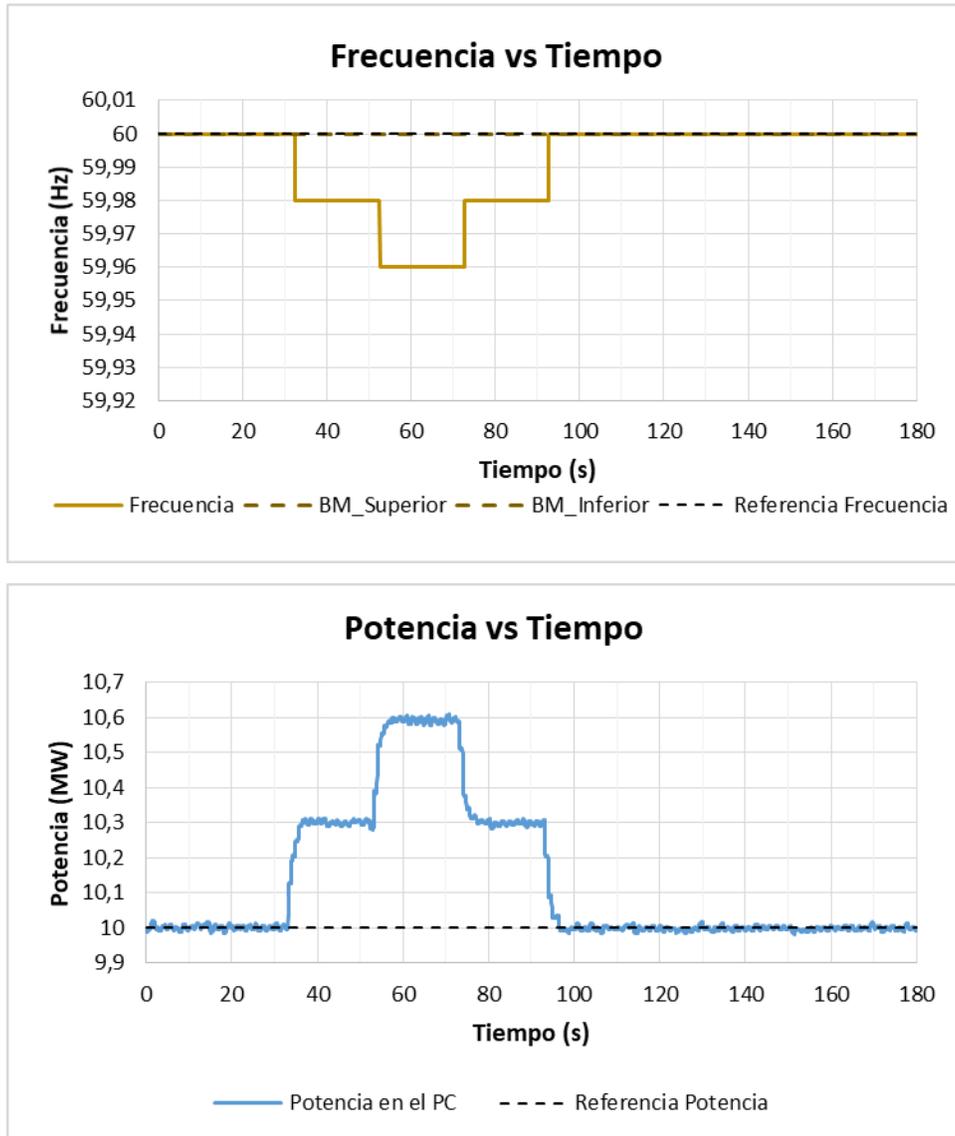


Figura 39. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso mínimo 0 mHz. Frecuencia vs tiempo (arriba) y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo (abajo)

La Figura 40 presenta en una misma gráfica (con dos ejes verticales) la variación de la potencia activa en el punto de conexión y de la frecuencia con respecto al tiempo. Como se observa, la variación en contrafase de la potencia activa inicia cuando la frecuencia es diferente de 60 Hz (banda muerta de 0 mHz).

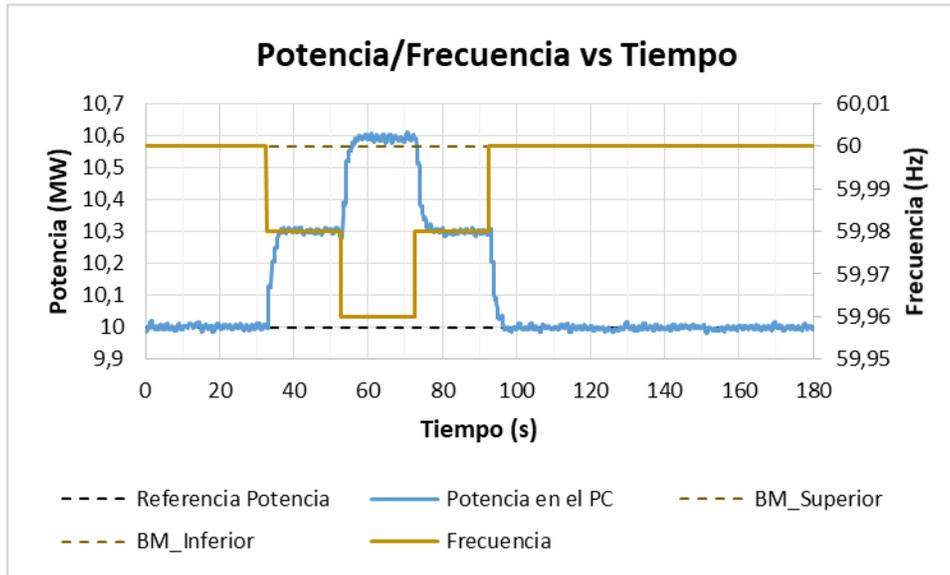


Figura 40. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso mínimo 0 mHz. Frecuencia y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo

Los resultados de la prueba demuestran que el control se encuentra configurado con una Banda muerta de +0 mHz, valor que corresponde al mínimo establecido en la resolución CREG 060 de 2019. Las gráficas y tablas presentadas en esta sección se entregan en el archivo Excel del Anexo 2 al acuerdo C.N.O 1741, pestañas “Cálculo BM 0 mHz” y “Gráficas cálculo BM 0 mHz”.

Banda muerta valor máximo 120 MHz (Protocolo 1B, Numeral 3.5)

Para la ejecución de la prueba se siguen los pasos indicados en el numeral 3.5 del protocolo 1B del Anexo al acuerdo C.N.O 1741: “*Para el valor superior de banda muerta se deben realizar dos escalones ascendentes y dos escalones descendentes. El primero de estos escalones debe tener una magnitud menor al valor máximo del rango de banda muerta y el segundo escalón debe tener una magnitud mayor al valor máximo del rango de banda muerta*”. De acuerdo con lo anterior la prueba se hace utilizando la secuencia descrita a continuación:

- **Escalón de frecuencia descendente 1:** Se inyecta un escalón de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 60 Hz) para llegar a 59,98 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a 60 Hz y el estatismo programado (4 %)
- **Escalón de frecuencia descendente 2:** Se inyecta un escalón de -0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,98 Hz) para llegar a 59,96 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a 60 Hz y el estatismo programado (4 %)
- **Escalón de frecuencia ascendente 1:** Se inyecta un escalón de +0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,96 Hz) para llegar a 59,98 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa cambia de acuerdo con la desviación con respecto a 60 Hz y el estatismo programado (4 %)
- **Escalón de frecuencia ascendente 2:** Se inyecta un escalón de +0,02 Hz en la frecuencia (partiendo desde 59,98 Hz) para retornar a 60 Hz. Se mantiene la frecuencia en el nuevo valor por un periodo de tiempo superior al tiempo de establecimiento. La potencia activa retorna al valor de consigna de 10 MW.

La prueba se hace utilizando una potencia activa de referencia (consigna de potencia en el PPC sin considerar control de frecuencia) de 10 MW. El estatismo configurado durante la prueba es el estatismo predeterminado de 4%.

La Tabla 9 resume, en el formato definido en el Anexo 2 del Acuerdo 1741, los resultados de la prueba.

Tabla 9. Resultados prueba Banda Muerta - Caso máximo 120 mHz

Evento	Número del escalón	Fecha y hora	Valor inicial Frecuencia [Hz]	Valor Final Frecuencia [Hz]	Valor inicial potencia [MW]	Valor Final potencia [MW]	Potencia de referencia [MW]	Valor inicial frecuencia [Hz]*	Valor Final Frecuencia [Hz]*
Escalón ascendente	1	2/08/2024 12:10	60	60,06	10,00	10,00	10	60,00	60,06
Escalón ascendente	2	2/08/2024 12:10	60,06	60,12	10,00	10,00	10	60,06	60,12
Escalón ascendente	3	2/08/2024 12:10	60,12	60,18	10,00	9,13	10	60,12	60,18
Escalón ascendente	4	2/08/2024 12:10	60,18	60	9,13	10,00	10	60,18	60,00
Escalón descendente	1	2/08/2024 12:10	60	59,94	10,00	10,00	10	60,00	59,94
Escalón descendente	2	2/08/2024 12:10	59,94	59,88	10,00	10,00	10	59,94	59,88
Escalón descendente	3	2/08/2024 12:11	59,88	59,82	10,00	10,87	10	59,88	59,82
Escalón descendente	4	2/08/2024 12:11	59,82	60	10,87	10,00	10	59,82	60,00

*Estos valores podrán ser iguales a los de las columnas 4 y 5 en caso de que la variable a modificar sea la Frecuencia.

La Figura 41 presenta la variación de la potencia activa en el punto de conexión con respecto a la variación en el tiempo de la frecuencia.

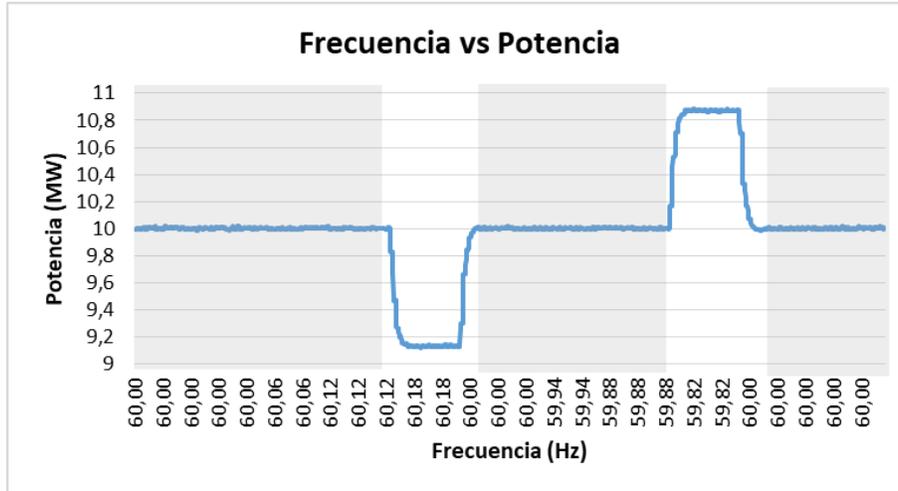


Figura 41. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión

La Figura 42 presenta la variación de la potencia activa en el punto de conexión con respecto a los valores de la frecuencia durante la prueba, ordenando los puntos de acuerdo con el valor de la frecuencia.

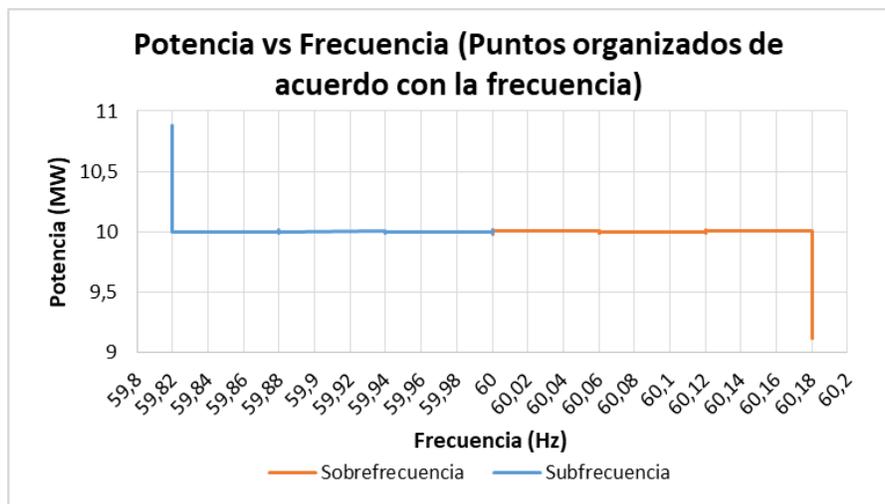


Figura 42. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia vs Potencia activa en el Punto de Conexión

La Figura 43 presenta de forma separada la variación de la potencia activa en el punto de conexión y la variación de la frecuencia con respecto al tiempo, durante la prueba. Como se observa, la variación en contrafase de la potencia activa inicia cuando la frecuencia sale de la banda muerta de 120 mHz.

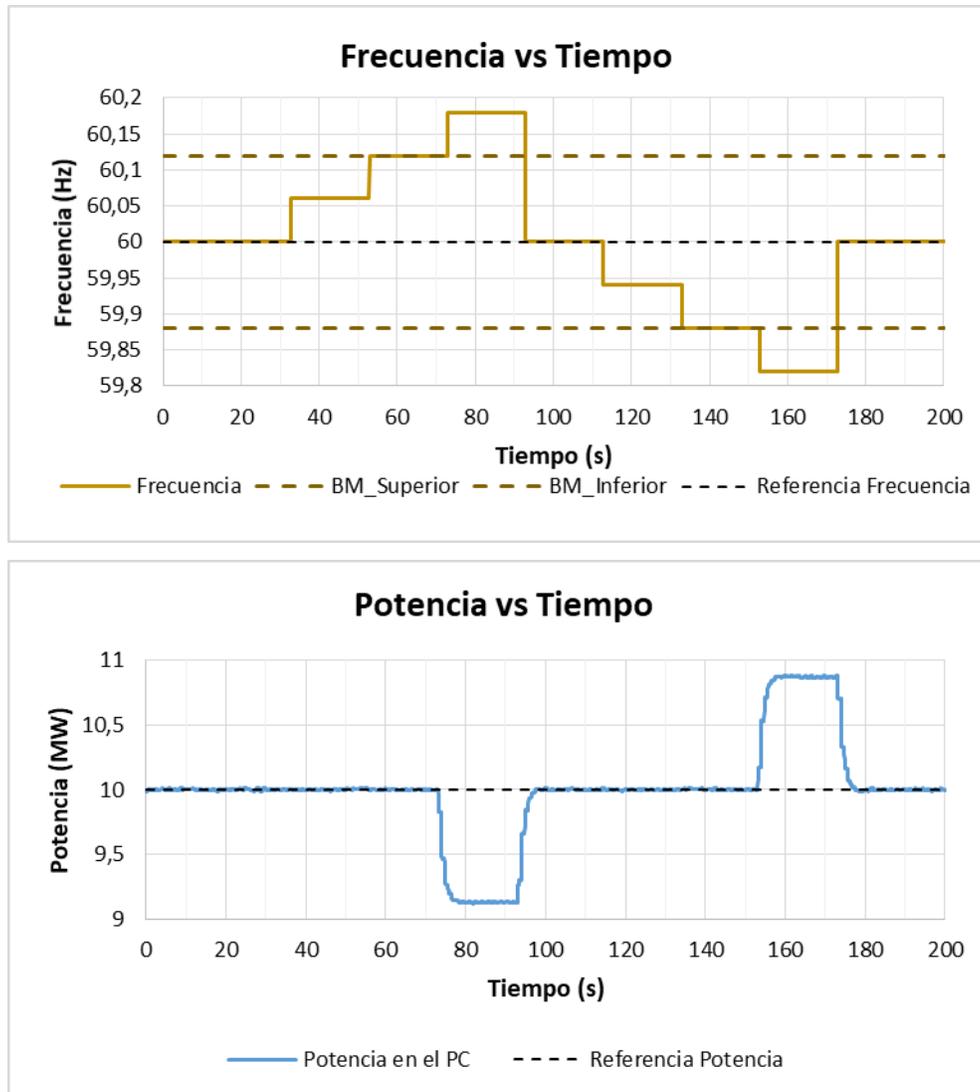


Figura 43. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia vs tiempo (arriba) y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo (abajo)

La Figura 44 presenta en una misma gráfica (con dos ejes verticales) la variación de la potencia activa en el punto de conexión y de la frecuencia con respecto al tiempo. Como se observa, la variación en contrafase de la potencia activa inicia cuando la frecuencia sale de la banda muerta de 120 mHz

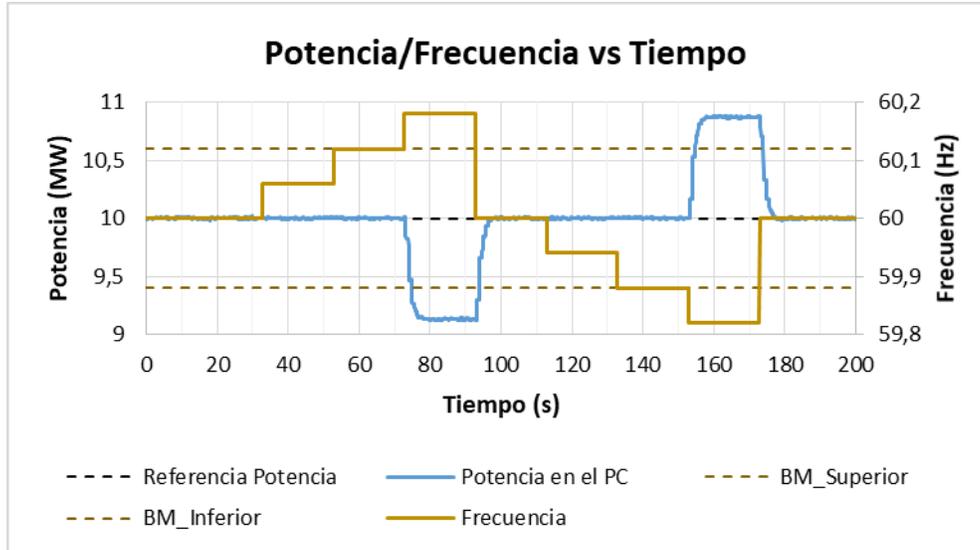


Figura 44. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba banda muerta Caso máximo 120 mHz. Frecuencia y Potencia activa en el Punto de Conexión vs tiempo

Los resultados de la prueba demuestran que el control se encuentra configurado con una Banda muerta de ± 120 mHz, valor que corresponde al máximo establecido en la resolución CREG 060 de 2019. Las gráficas y tablas presentadas en esta sección se entregan en el archivo Excel del Anexo 2 al acuerdo C.N.O 1741, pestañas “Cálculo BM 120 mHz” y “Gráficas cálculo BM 120 mHz”.

7. PRUEBAS DE VERIFICACION DE RECEPCION DE CONSIGNAS DE FORMA LOCAL

Siguiendo el procedimiento establecido en el Protocolo 2 del Anexo al Acuerdo C.N.O 1741 se verifica que la planta recibe y gestiona consignas de potencia activa de forma local. Para esta verificación se siguió el procedimiento descrito a continuación:

Partiendo de un valor inicial de 6 MW de entrega de potencia activa en el punto de conexión se envió un cambio de consigna con un incremento de 2,8 MW (nuevo valor de consigna 8,8 MW)

Partiendo de un valor inicial de 8,8 MW de entrega de potencia activa en el punto de conexión se envió un cambio de consigna con un decremento de 2,8 MW (nuevo valor de consigna 6 MW)

De la Figura 45 a la Figura 46 se presentan los valores de potencia activa contra tiempo para los dos casos descritos arriba. Para la prueba se configuró una rampa de 3,85 MW/min (11 %Pnom/min). Los resultados de las pruebas realizadas el día 04/18/2024 a la hora 9:11 a.m se presentan en el archivo Excel correspondiente al Anexo 3 del Acuerdo C.N.O 1741.

Las pruebas se coordinaron con el CND para el desarrollo de las mismas, los datos de la comunicación son los siguientes:

- Operador del CND: Sergio Pizarro.
- Rampa ajustada: 14%.
- Fecha: 18 de abril de 2024.

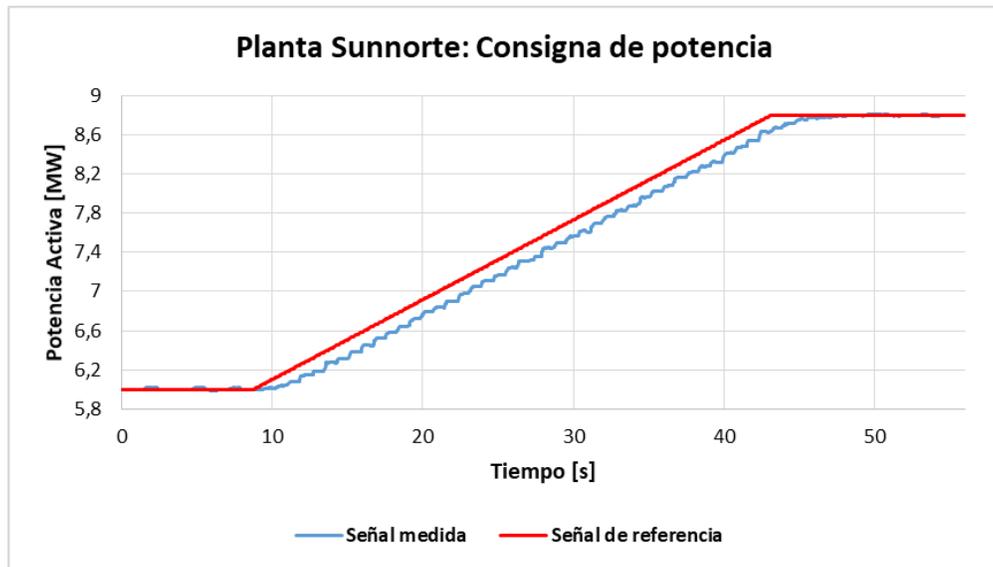


Figura 45. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba recepción de consigna local – Escalón ascendente.

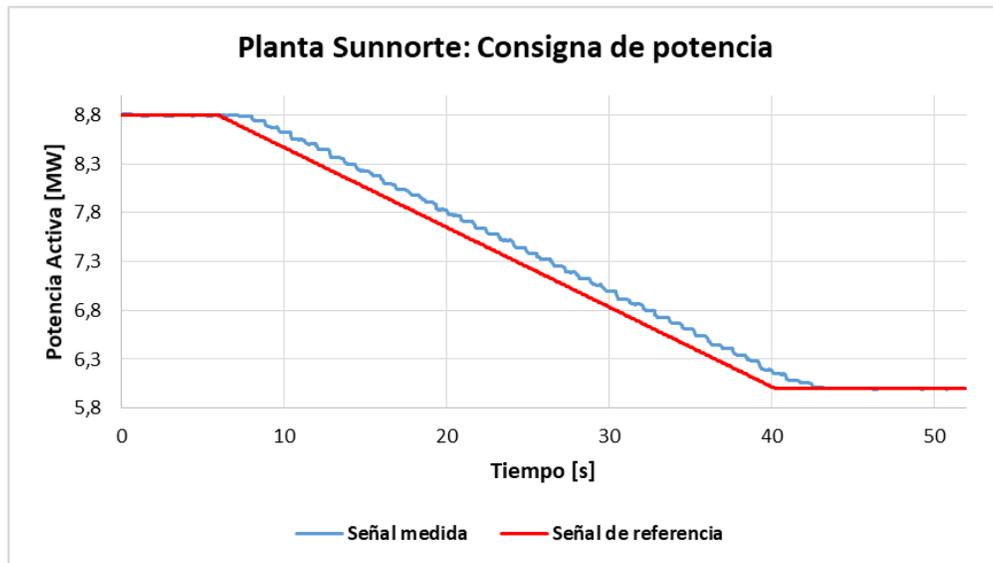


Figura 46. Acuerdo C.N.O 1741 – Prueba recepción de consigna local – Escalón descendente.

8. PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE LAS RAMPAS OPERATIVAS

Siguiendo el procedimiento establecido en el Protocolo 4 del Anexo del Acuerdo C.N.O 1741 se verifica el comportamiento de las rampas operativas de arranque y parada de la planta solar Sunnorte. Para esta verificación se siguió el procedimiento descrito a continuación:

Partiendo de un valor inicial de 1 MW de entrega de potencia activa en el punto de conexión se envió un cambio de consigna con un incremento de 5,6 MW (80% del rango disponible de generación de la planta) con un nuevo valor de consigna de 6,6 MW.

Partiendo de un valor inicial de 6,6 MW de entrega de potencia activa en el punto de conexión se envió un cambio de consigna con un decremento de 5,6 MW con un nuevo valor de consigna de 1 MW.

Este procedimiento se repite 5 veces para varios valores configurables de rampa. Para este caso, se configuraron 4 valores de rampa: 2,45 MW/min (7 %P_{nom}/min), 3,675 MW/min (10,5 %P_{nom}/min), 4,9 MW/min (14 %P_{nom}/min) y 35 MW/min (100 %P_{nom}/min).

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN – RAMPA DEL 7%

En la Tabla 10 y Tabla 11 se presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La Tabla 10 se presenta en la pestaña “Cálculo rampas de toma de carga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741 y la Tabla 11 se presenta en la pestaña “Cálculo velocidad de descarga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741. Como se observa de las tablas, los resultados de la prueba demuestran que la rampa se puede configurar con un valor de 2,45 MW/min (7 %P_{nom}/min).

Tabla 10. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 7 %Pnom/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 12:05	5,6	80%	2,4449	6,99%
2	9/02/2024 12:09	5,6	80%	2,4338	6,95%
3	9/02/2024 12:14	5,6	80%	2,4361	6,96%
4	9/02/2024 12:19	5,6	80%	2,4403	6,97%
5	9/02/2024 12:24	5,6	80%	2,4559	7,02%
Promedio				2,4422	6,98%
Desviación estándar				0,008756569	
Coeficiente de variación				0,36%	
Error entre valor ajustado y medido				0,32%	

Tabla 11. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 7 %Pnom/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 12:07	-5,6	-80%	-2,4580	-7,02%
2	9/02/2024 12:12	-5,6	-80%	-2,4461	-6,99%
3	9/02/2024 12:17	-5,6	-80%	-2,4309	-6,95%
4	9/02/2024 12:21	-5,6	-80%	-2,4392	-6,97%
5	9/02/2024 12:26	-5,6	-80%	-2,4556	-7,02%
Promedio				-2,4460	-6,99%
Desviación estándar				0,011296791	
Coeficiente de variación				-0,46%	
Error entre valor ajustado y medido				0,16%	

De la Figura 57 a la Figura 66 se presenta de forma gráfica los resultados de la prueba. Las gráficas que componen las figuras mostradas se presentan en las pestañas “Gráficas cálculo vel. toma carg” y “Gráficas cálculo vel. descarga”, del archivo Excel del Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741.

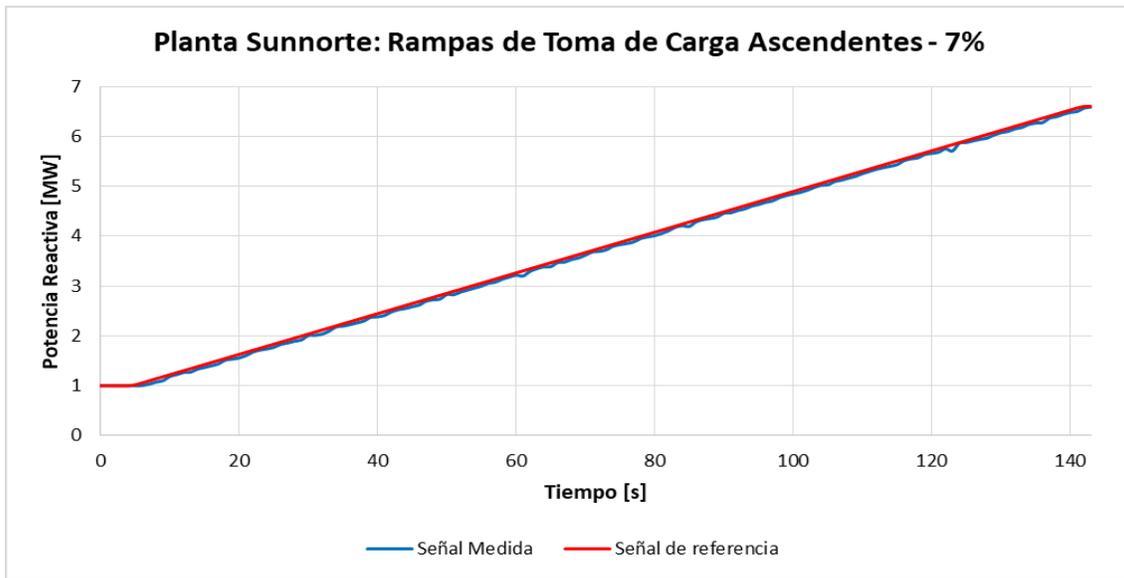


Figura 47. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

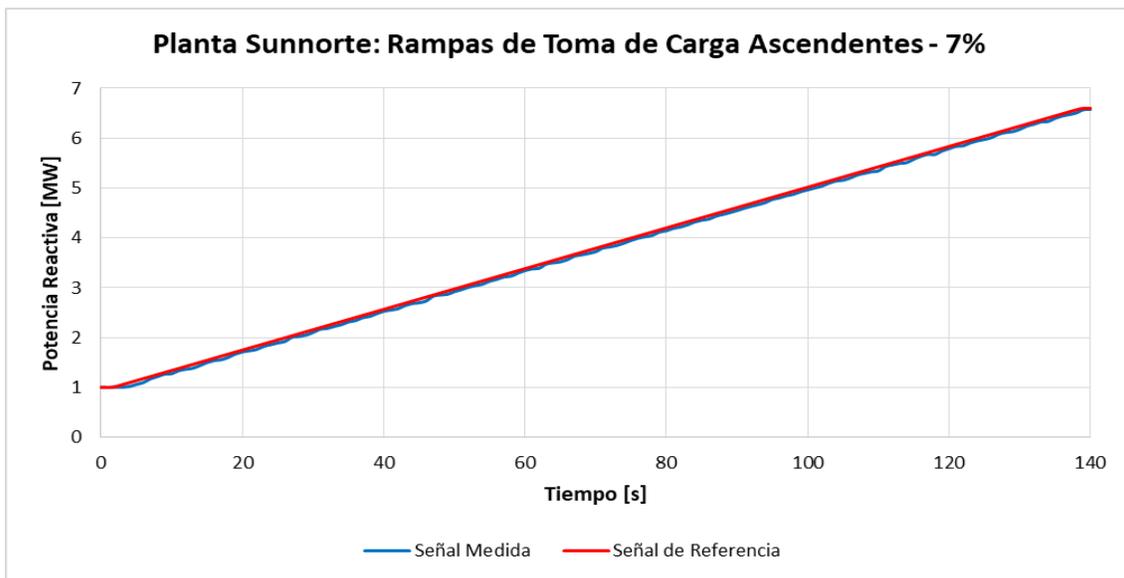


Figura 48. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

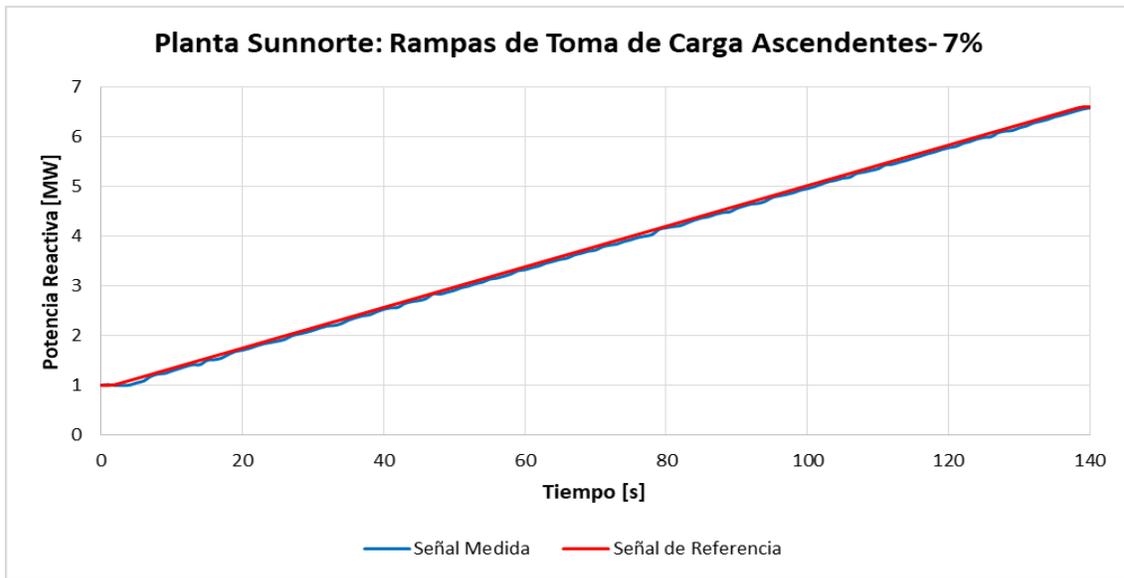


Figura 49. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

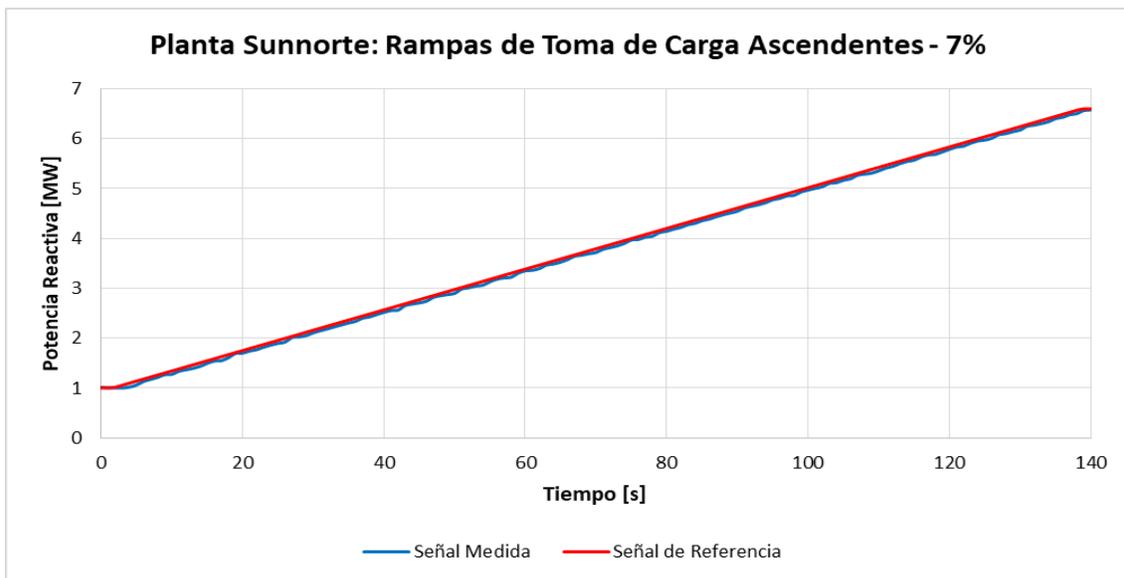


Figura 50. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

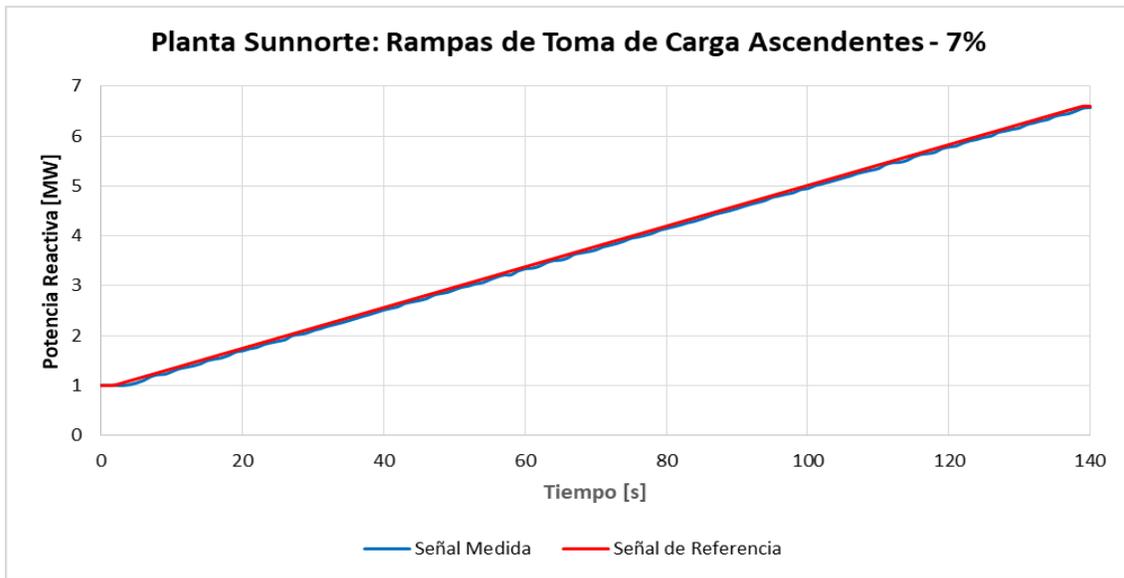


Figura 51. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 7% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

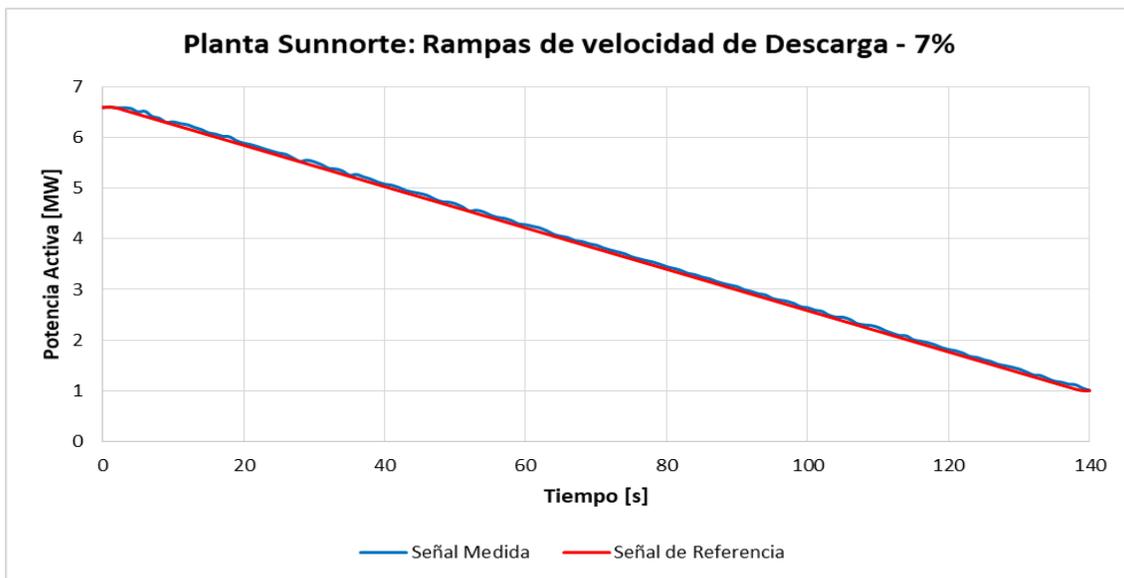


Figura 52. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

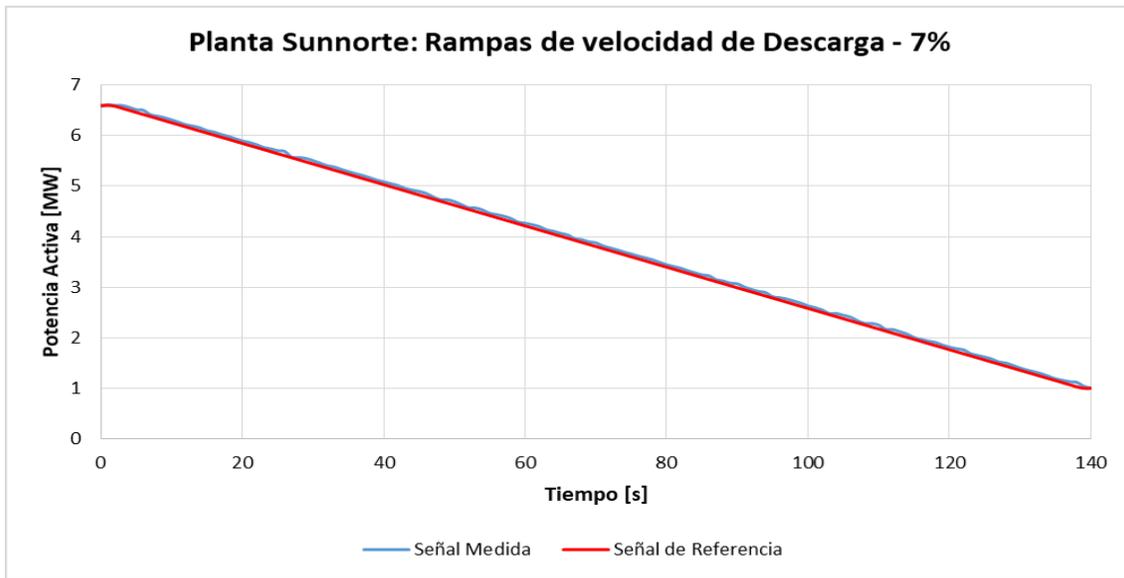


Figura 53. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

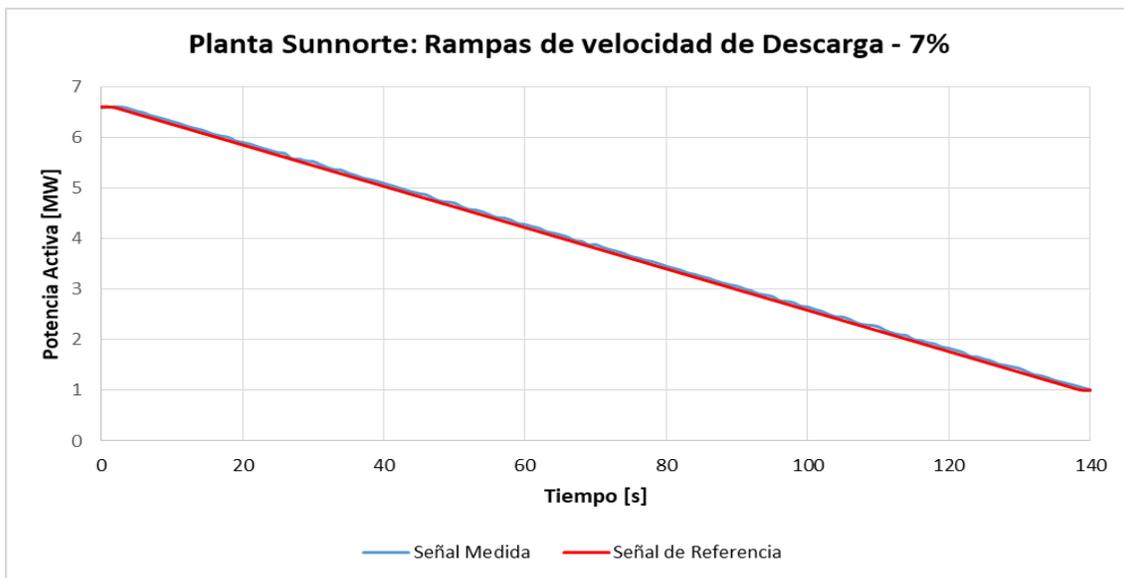


Figura 54. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

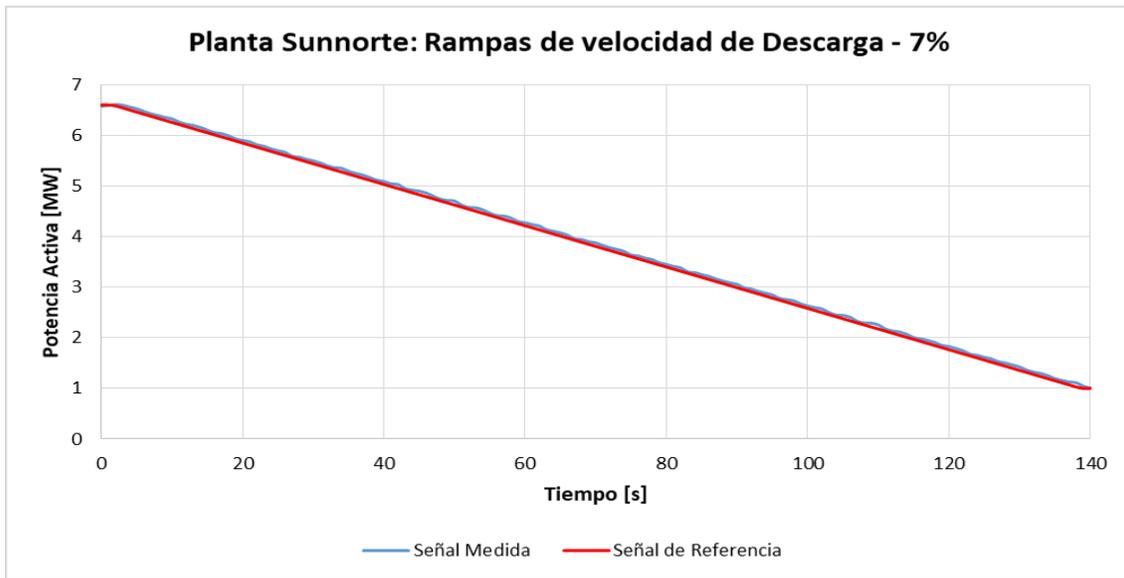


Figura 55. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

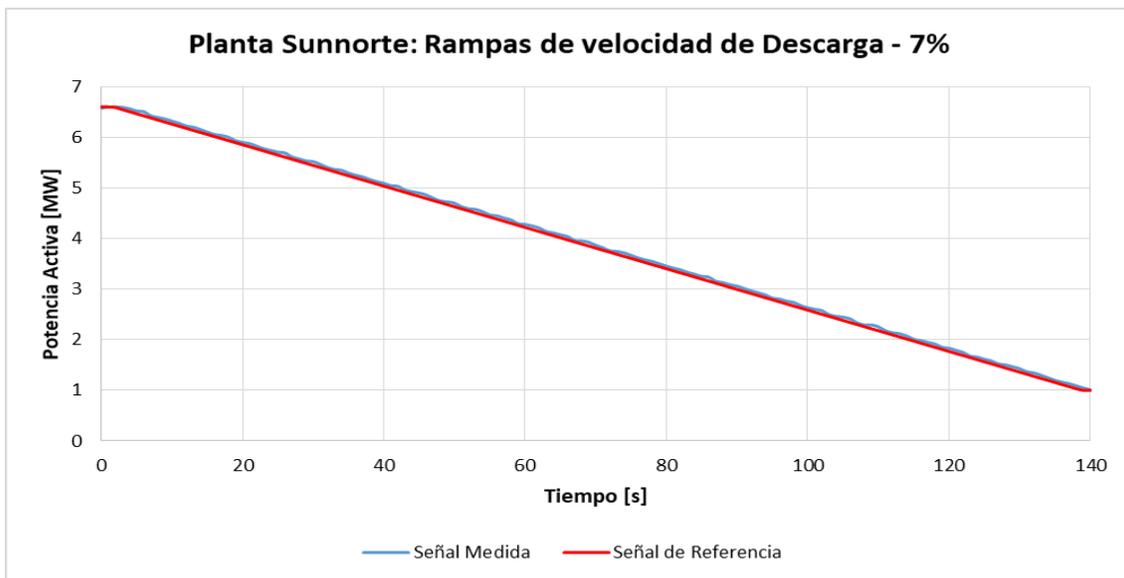


Figura 56. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 7% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN – RAMPA DEL 10,5%

En la Tabla 12 y Tabla 13 se presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La Tabla 12 se presenta en la pestaña “Cálculo rampas de toma de carga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741 y la Tabla 13 se presenta en la pestaña “Cálculo velocidad de descarga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741. Como se observa de las tablas, los resultados de la prueba demuestran que la rampa se puede configurar con un valor de 3,675 MW/min (10,5 %Pnom/min).

Tabla 12. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 10,5 %Pnom/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 11:35	5,6	80%	3,6889	10,54%
2	9/02/2024 11:39	5,6	80%	3,6648	10,47%
3	9/02/2024 11:42	5,6	80%	3,6883	10,54%
4	9/02/2024 11:46	5,6	80%	3,6780	10,51%
5	9/02/2024 11:50	5,6	80%	3,6728	10,49%
Promedio				3,6786	10,51%
Desviación estándar				0,010312525	
Coefficiente de variación				0,28%	
Error entre valor ajustado y medido				0,10%	

Tabla 13. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 10,5 %Pnom/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 11:37	-5,6	-80%	-3,6866	-10,53%
2	9/02/2024 11:41	-5,6	-80%	-3,6659	-10,47%
3	9/02/2024 11:44	-5,6	-80%	-3,6725	-10,49%
4	9/02/2024 11:48	-5,6	-80%	-3,6890	-10,54%
5	9/02/2024 11:52	-5,6	-80%	-3,7018	-10,58%
Promedio				-3,6832	-10,52%
Desviación estándar				0,014168619	
Coefficiente de variación				-0,38%	
Error entre valor ajustado y medido				0,22%	

De la Figura 57 a la Figura 66 se presenta de forma gráfica los resultados de la prueba. Las gráficas que componen las figuras mostradas se presentan en las pestañas “Gráficas cálculo vel. toma carg” y “Gráficas cálculo vel. descarga”, del archivo Excel del Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741.

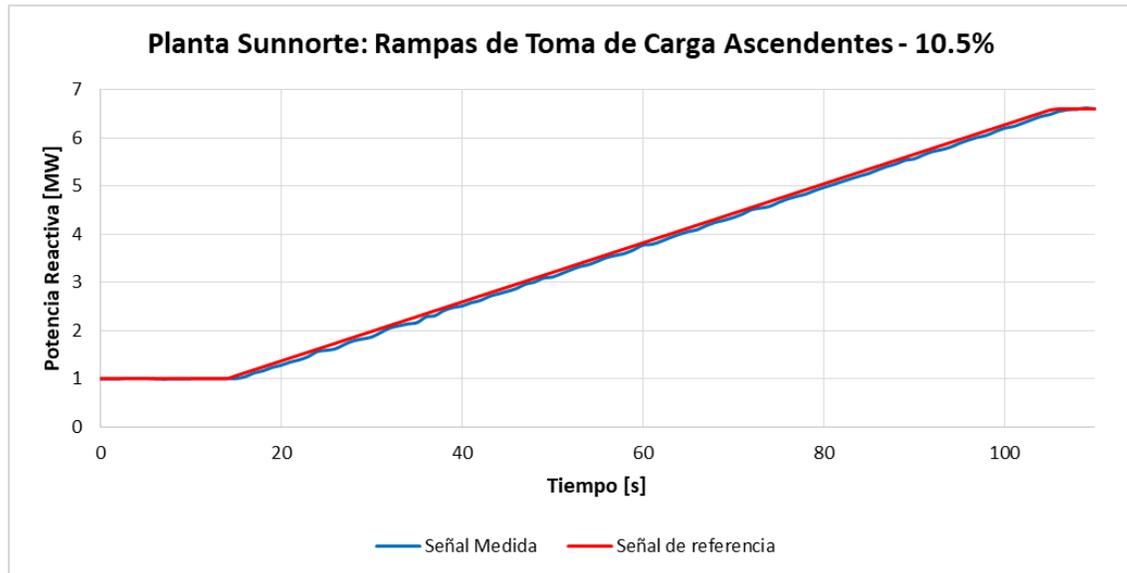


Figura 57. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

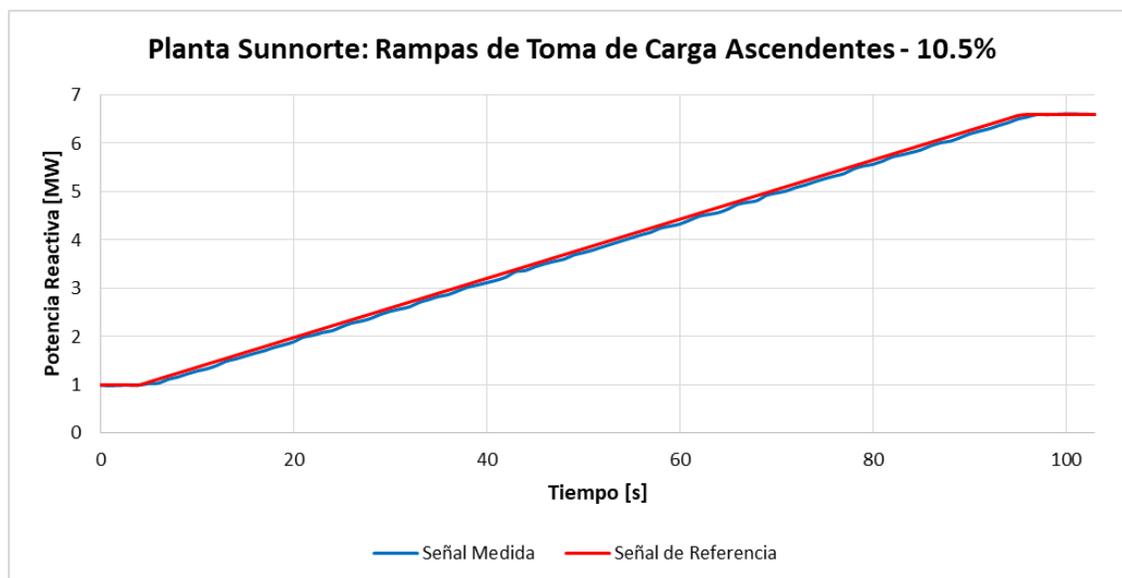


Figura 58. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

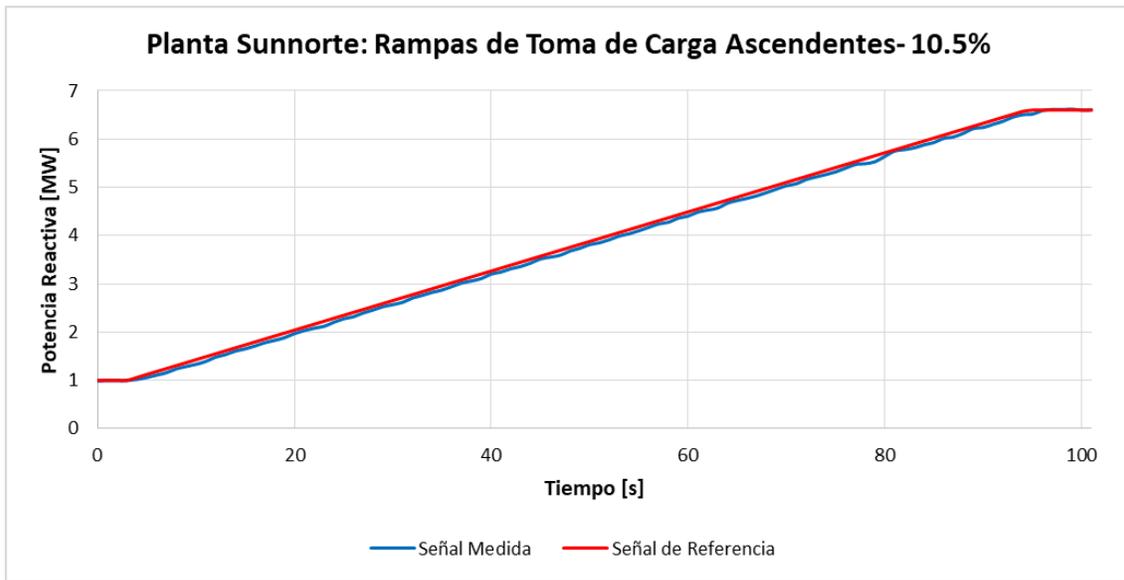


Figura 59. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

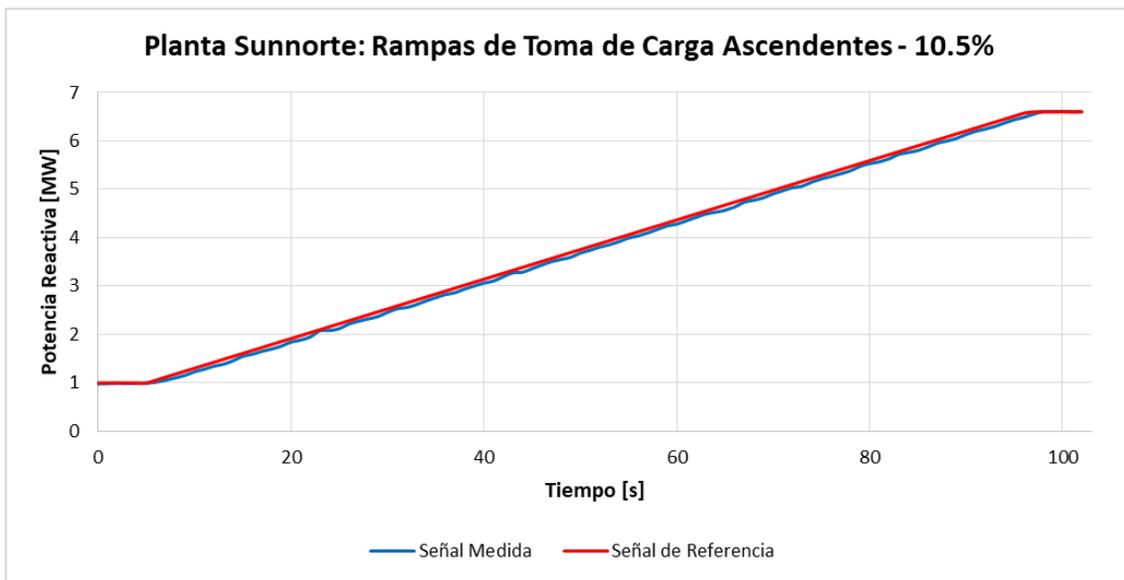


Figura 60. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

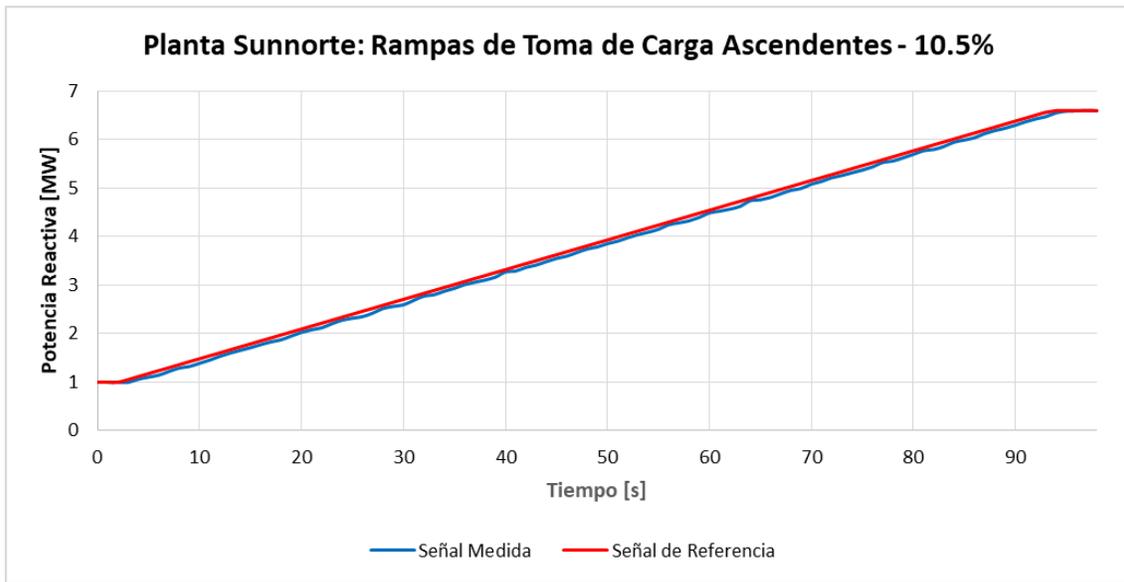


Figura 61. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 10,5% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

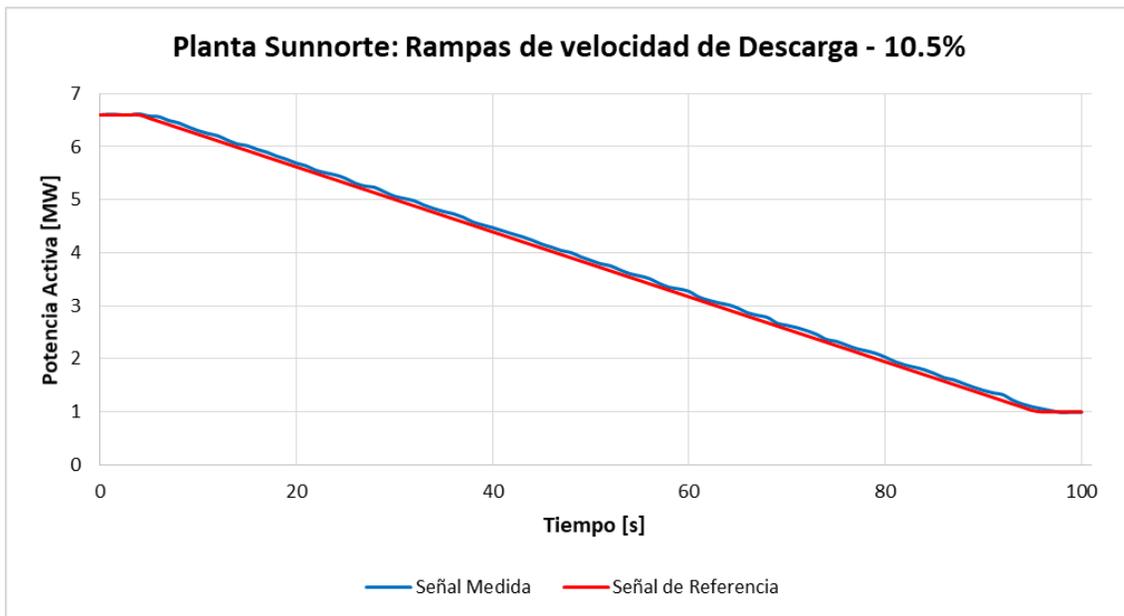


Figura 62. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

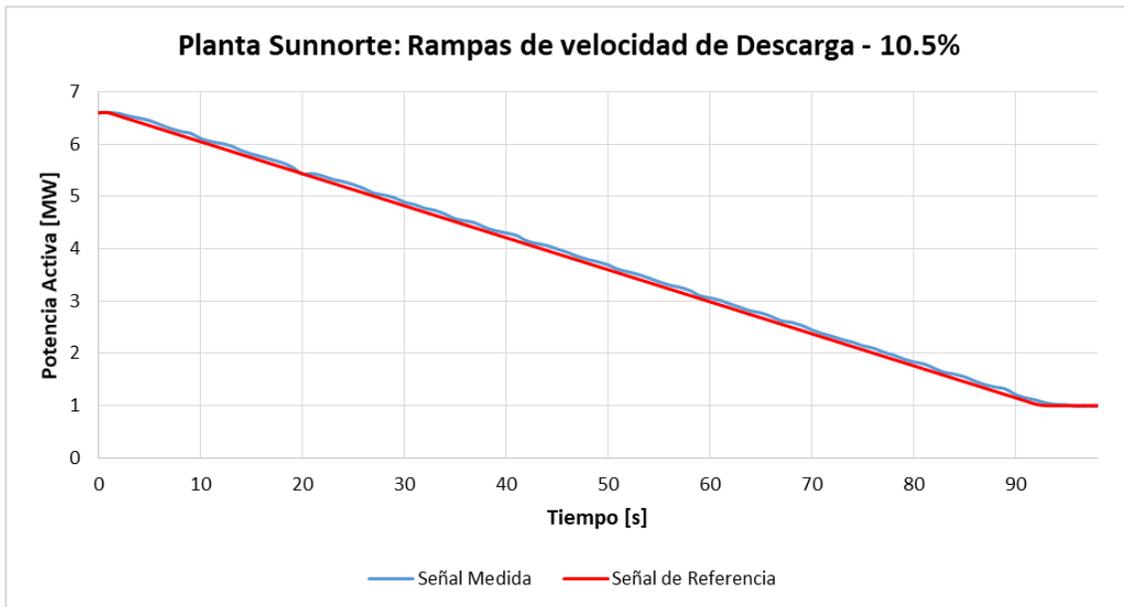


Figura 63. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

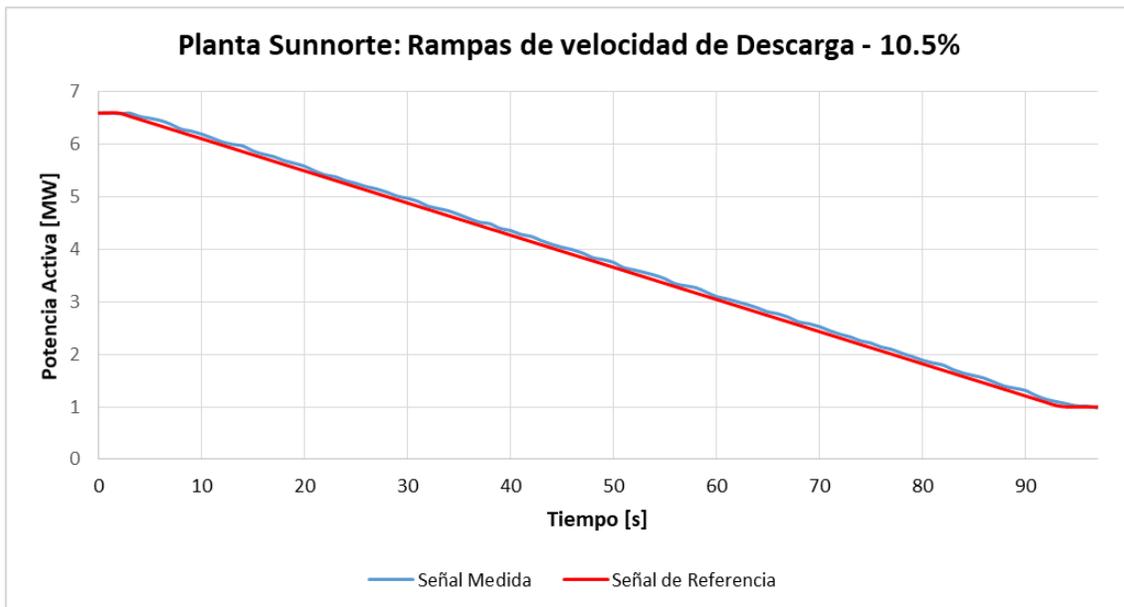


Figura 64. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

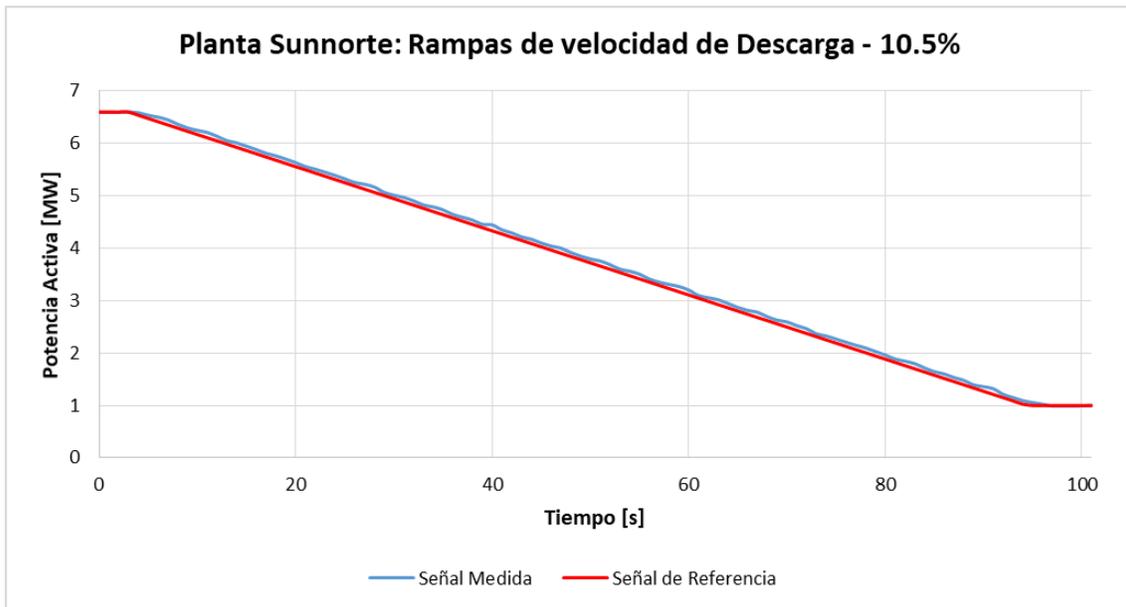


Figura 65. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

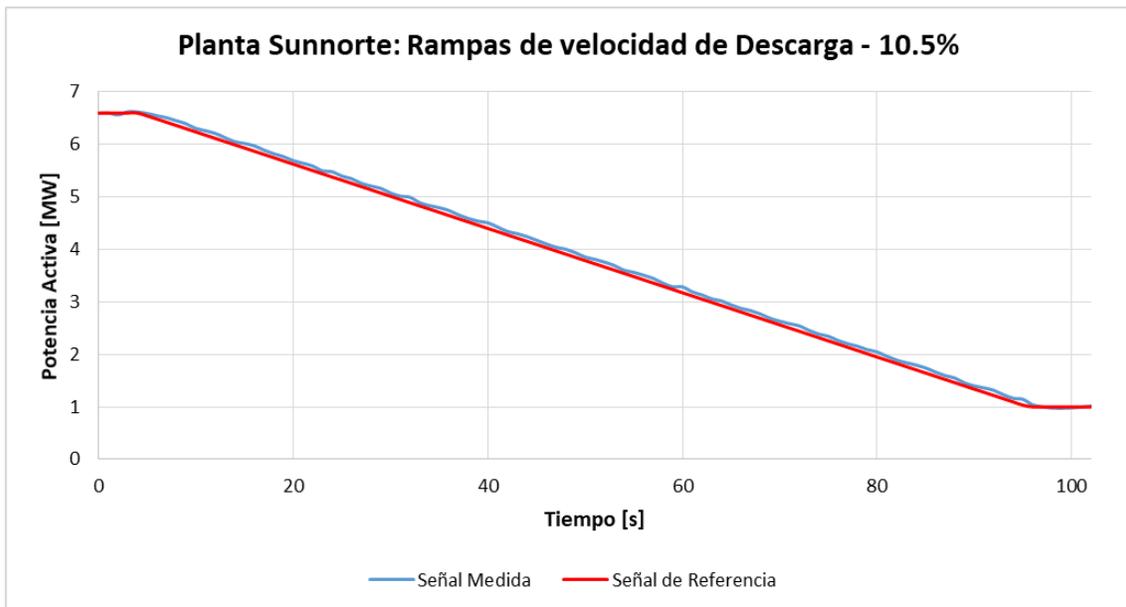


Figura 66. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 10,5% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN – RAMPA DEL 14%

En la Tabla 14 y Tabla 15 se presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La Tabla 14 se presenta en la pestaña “Cálculo rampas de toma de carga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741 y la Tabla 15 se presenta en la pestaña “Cálculo velocidad de descarga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741. Como se observa de las tablas, los resultados de la prueba demuestran que la rampa se puede configurar con un valor de 4,9 MW/min (14%/min).

Tabla 14. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 14%/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 11:10	5,6	16%	4,9592	14,17%
2	9/02/2024 11:14	5,6	16%	4,9236	14,07%
3	9/02/2024 11:17	5,6	16%	4,8791	13,94%
4	9/02/2024 11:21	5,6	16%	4,8516	13,86%
5	9/02/2024 11:25	5,6	16%	4,8828	13,95%
Promedio				4,8992	14,00%
Desviación estándar				0,042251223	
Coefficiente de variación				0,86%	
Error entre valor ajustado y medido				0,02%	

Tabla 15. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 14%/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 11:12	-5,6	-16%	-4,8412	-13,83%
2	9/02/2024 11:16	-5,6	-16%	-4,8840	-13,95%
3	9/02/2024 11:19	-5,6	-16%	-4,9499	-14,14%
4	9/02/2024 11:23	-5,6	-16%	-4,8894	-13,97%
5	9/02/2024 11:27	-5,6	-16%	-4,8674	-13,91%
Promedio				-4,8864	-13,96%
Desviación estándar				0,040162157	
Coefficiente de variación				-0,82%	
Error entre valor ajustado y medido				0,28%	

De la Figura 67 a la Figura 76 se presenta de forma gráfica los resultados de la prueba. Las gráficas que componen las figuras mostradas se presentan en las pestañas “Gráficas cálculo vel. toma carg” y “Gráficas cálculo vel. descarga”, del archivo Excel del Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741.

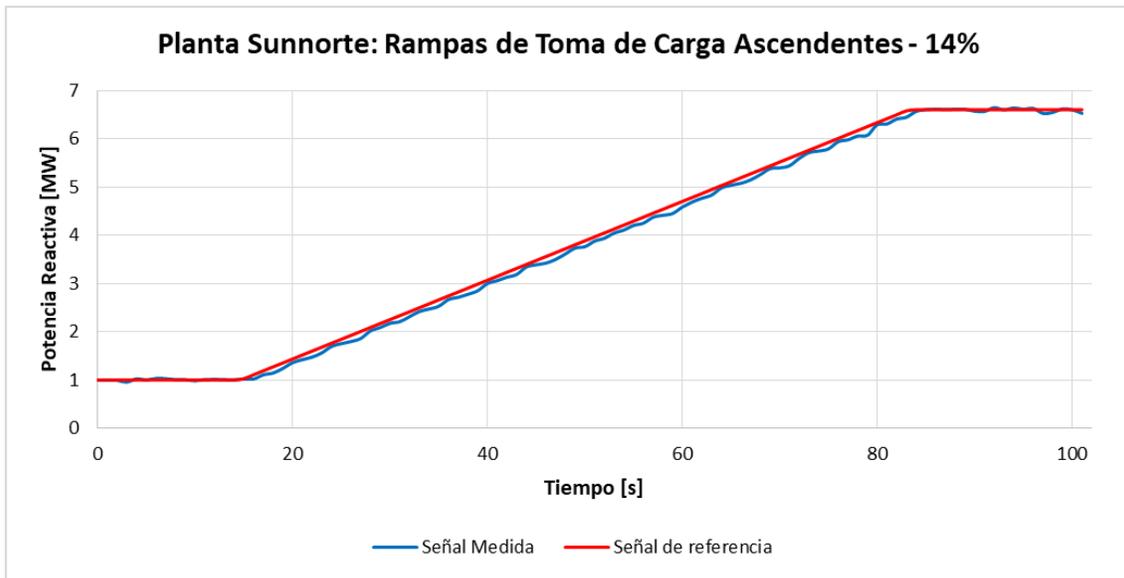


Figura 67. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

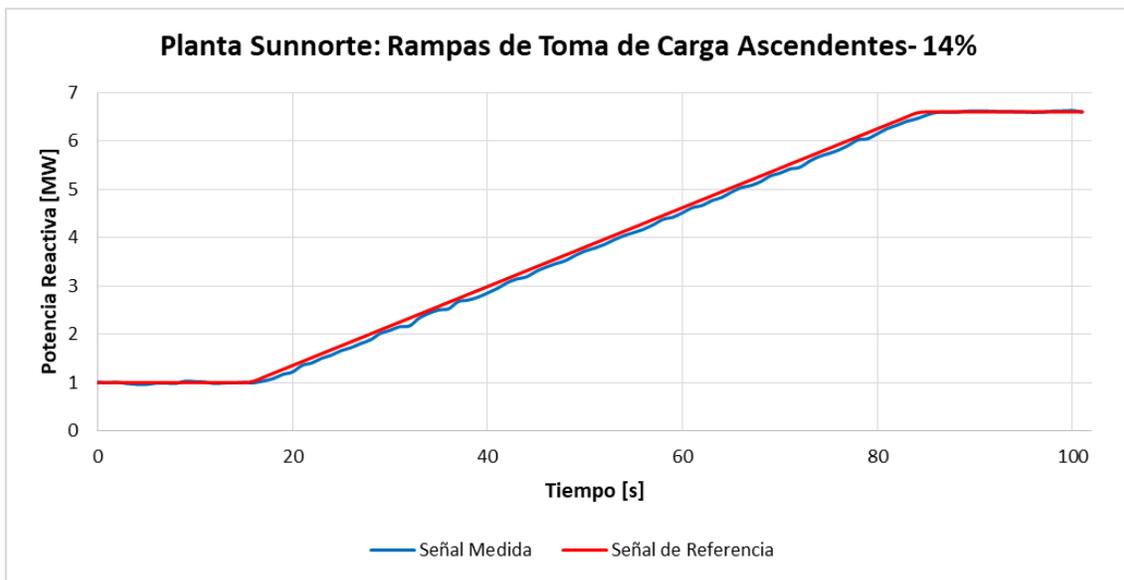


Figura 68. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

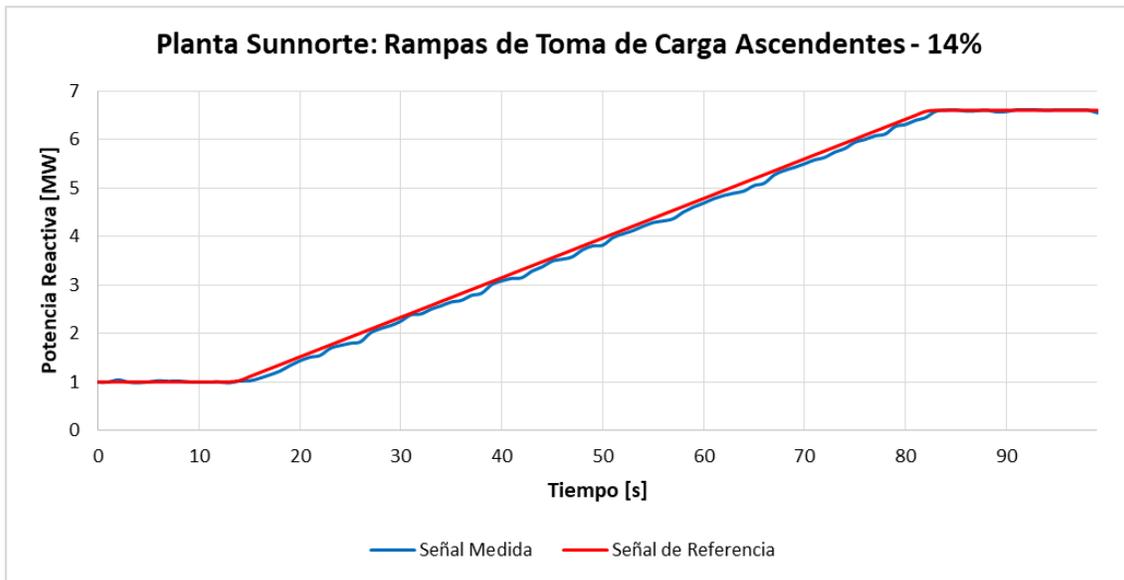


Figura 69. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

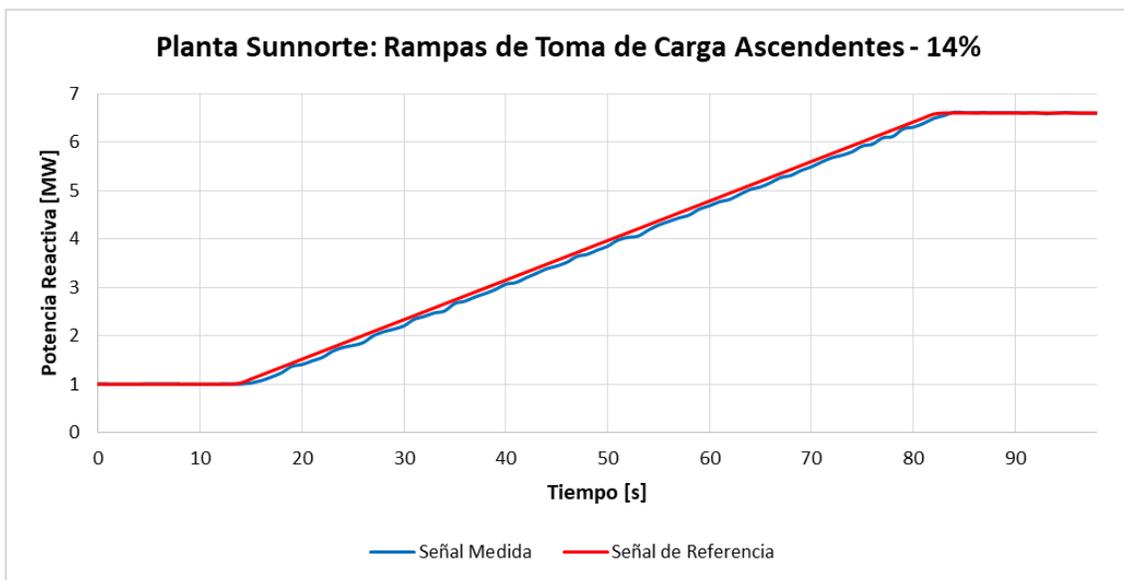


Figura 70. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

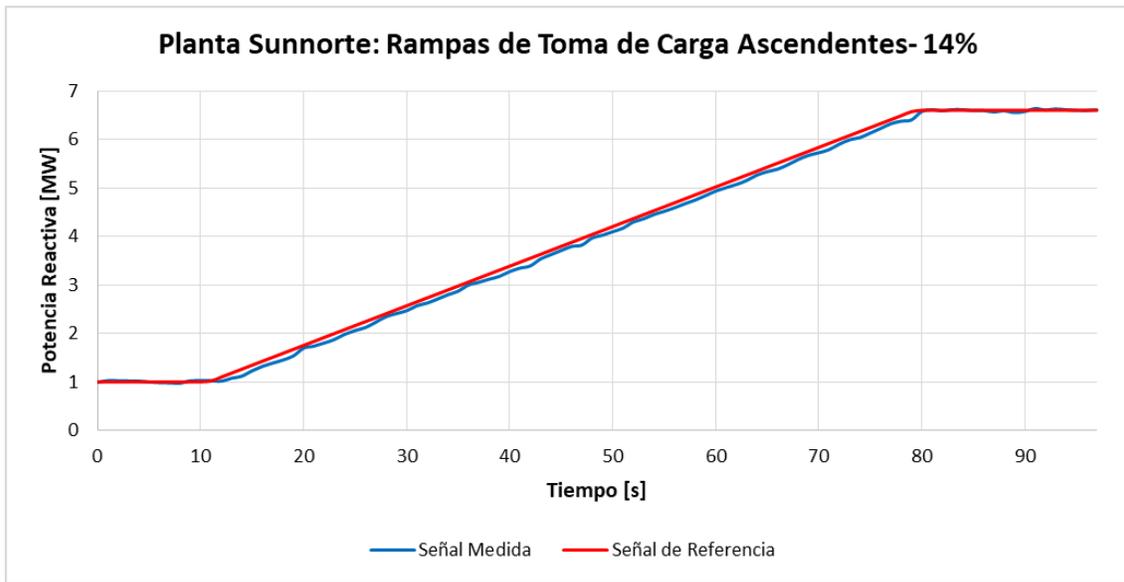


Figura 71. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 14% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

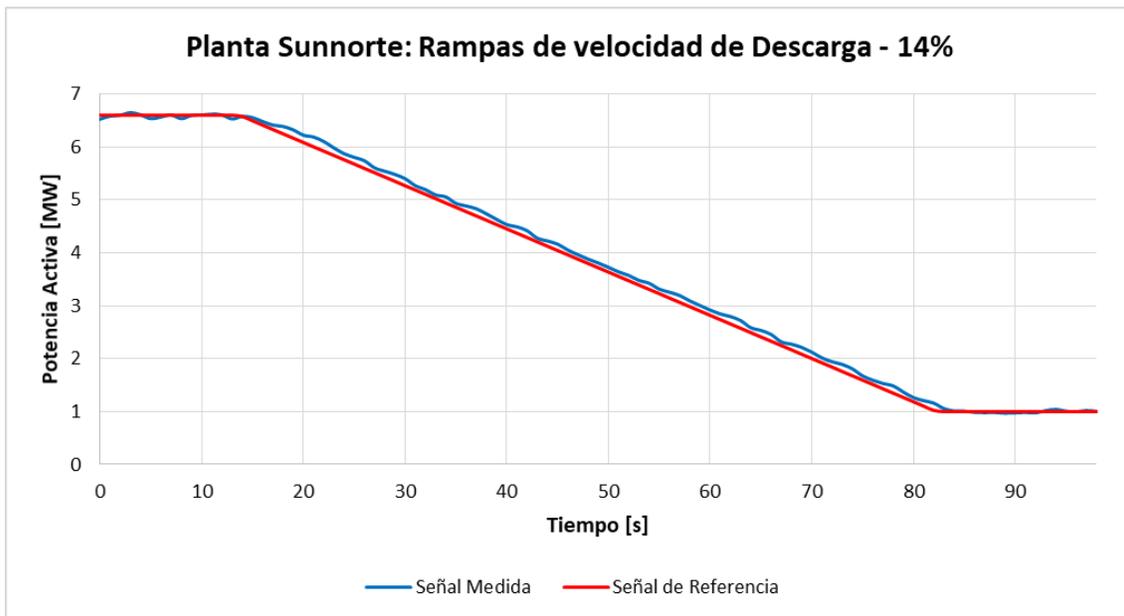


Figura 72. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

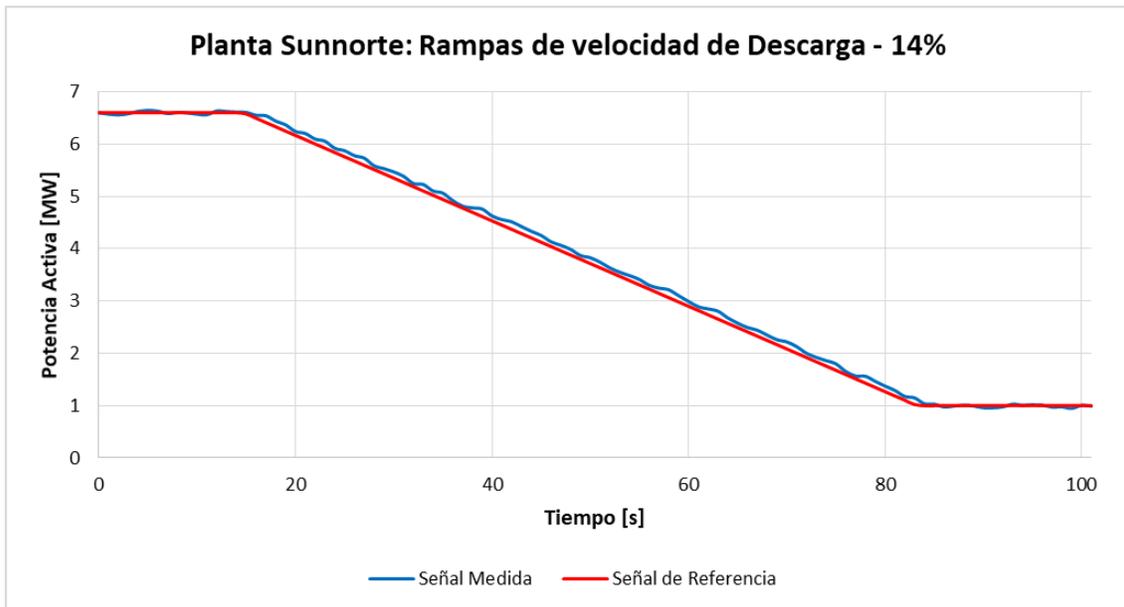


Figura 73. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

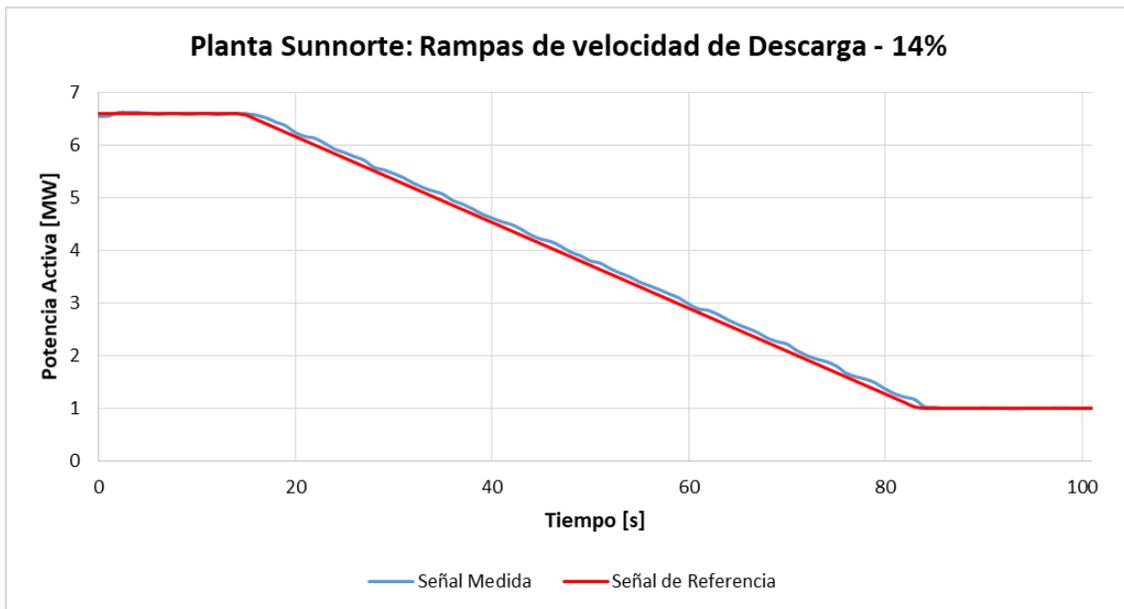


Figura 74. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

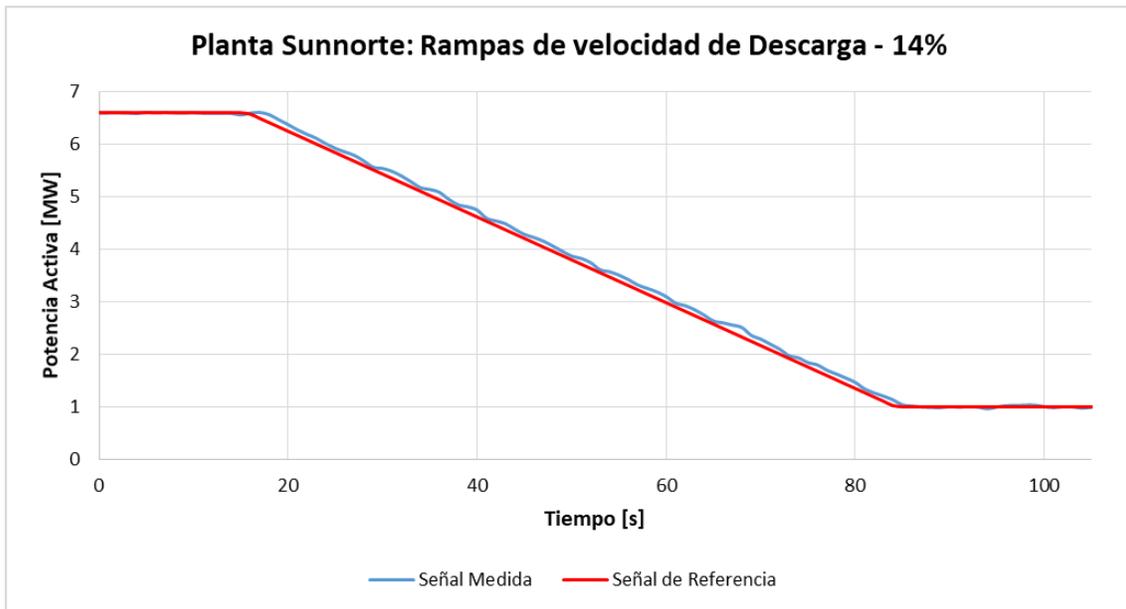


Figura 75. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

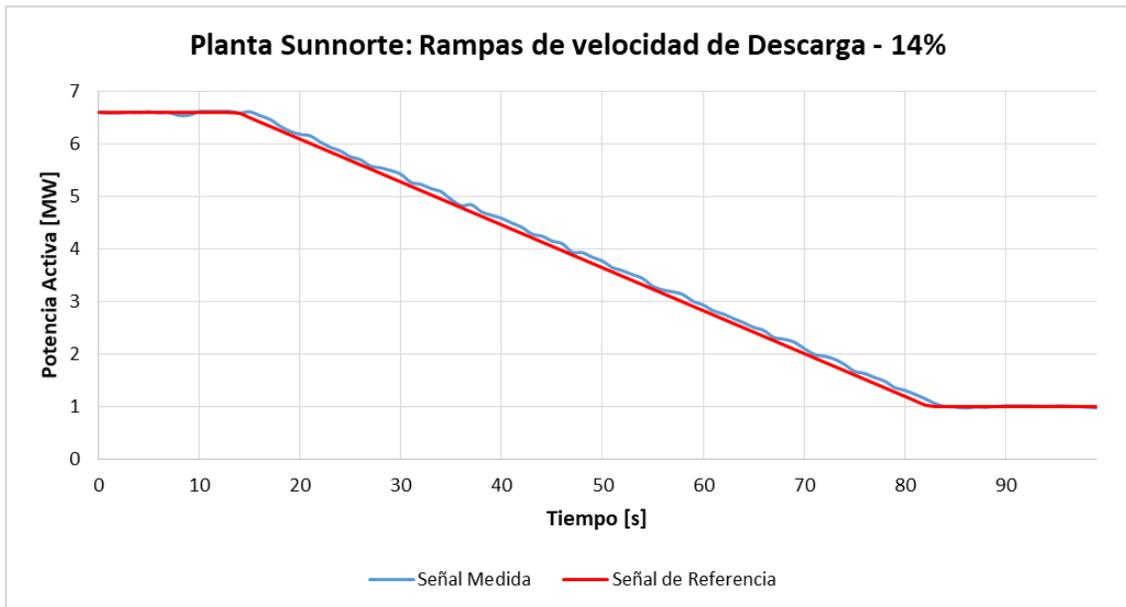


Figura 76. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 14% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

PRUEBAS DE VERIFICACIÓN – RAMPA DEL 100%

En la Tabla 16 y Tabla 17 se presenta de forma tabular, con el formato establecido en el Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741, un resumen de los resultados obtenidos para la prueba. La Tabla 16 se presenta en la pestaña “Cálculo rampas de toma de carga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741 y la Tabla 17 se presenta en la pestaña “Cálculo velocidad de descarga” del archivo Excel del Anexo 5 al Acuerdo C.N.O 1741. Como se observa de las tablas, los resultados de la prueba demuestran que la rampa se puede configurar con un valor de 35 MW/min (100%/min).

Tabla 16. Resultados prueba Rampa de toma de carga – Rampa del 100%/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 12:00	5,6	16%	35,1047	100,30%
2	9/02/2024 12:00	5,6	16%	34,5918	98,83%
3	9/02/2024 12:01	5,6	16%	34,5158	98,62%
4	9/02/2024 12:01	5,6	16%	35,0618	100,18%
5	9/02/2024 12:02	5,6	16%	35,0680	100,19%
Promedio				34,8684	99,62%
Desviación estándar				0,288928898	
Coefficiente de variación				0,83%	
Error entre valor ajustado y medido				0,38%	

Tabla 17. Resultados prueba velocidad de descarga – Rampa del 100%/min

Mínimo técnico (MW)		1	Potencia disponible(MW)		8
Número del escalón	Fecha y hora	Tamaño del escalón (MW)	Tamaño del escalón (%)	Velocidad (MW/min)	Velocidad (%Pnominal/min)
1	9/02/2024 12:00	-5,6	-16%	-35,0368	-100,11%
2	9/02/2024 12:01	-5,6	-16%	-34,7025	-99,15%
3	9/02/2024 12:01	-5,6	-16%	-36,1579	-103,31%
4	9/02/2024 12:02	-5,6	-16%	-35,2332	-100,67%
5	9/02/2024 12:02	-5,6	-16%	-36,6108	-104,60%
Promedio				-35,5482	-101,57%
Desviación estándar				0,802652033	
Coefficiente de variación				-2,26%	
Error entre valor ajustado y medido				1,57%	

De la Figura 77 a la Figura 86 se presenta de forma gráfica los resultados de la prueba. Las gráficas que componen las figuras mostradas se presentan en las pestañas “Gráficas cálculo vel. toma carg” y “Gráficas cálculo vel. descarga”, del archivo Excel del Anexo 5 del Acuerdo C.N.O 1741.

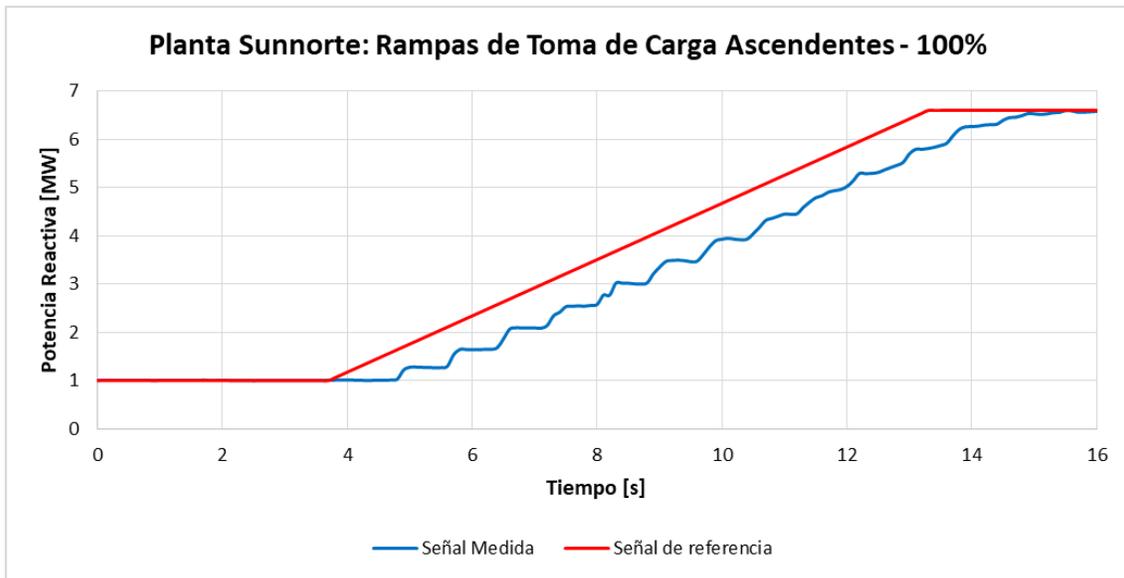


Figura 77. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

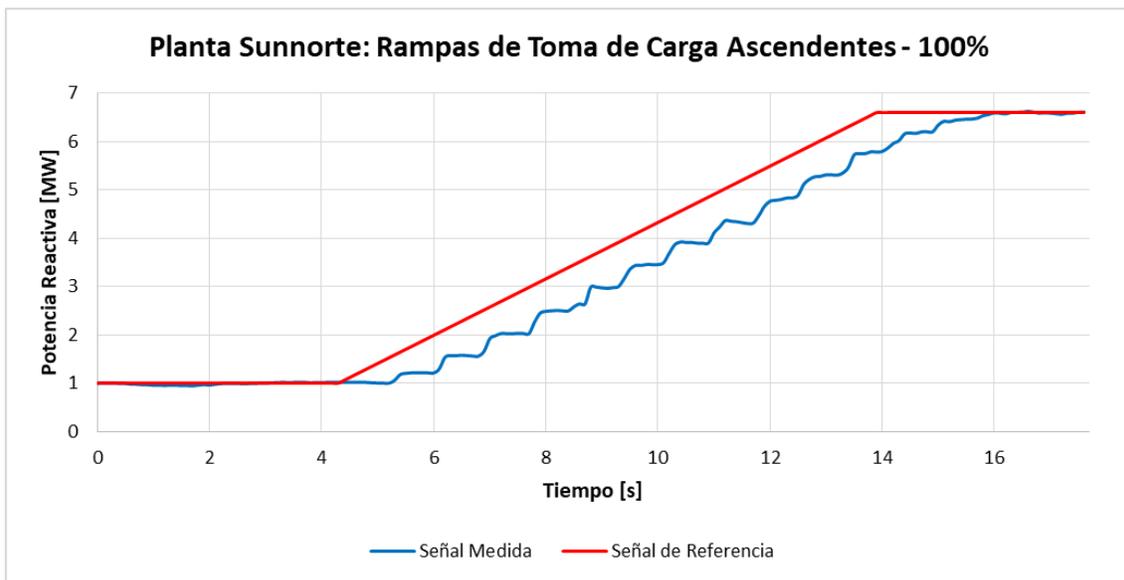


Figura 78. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

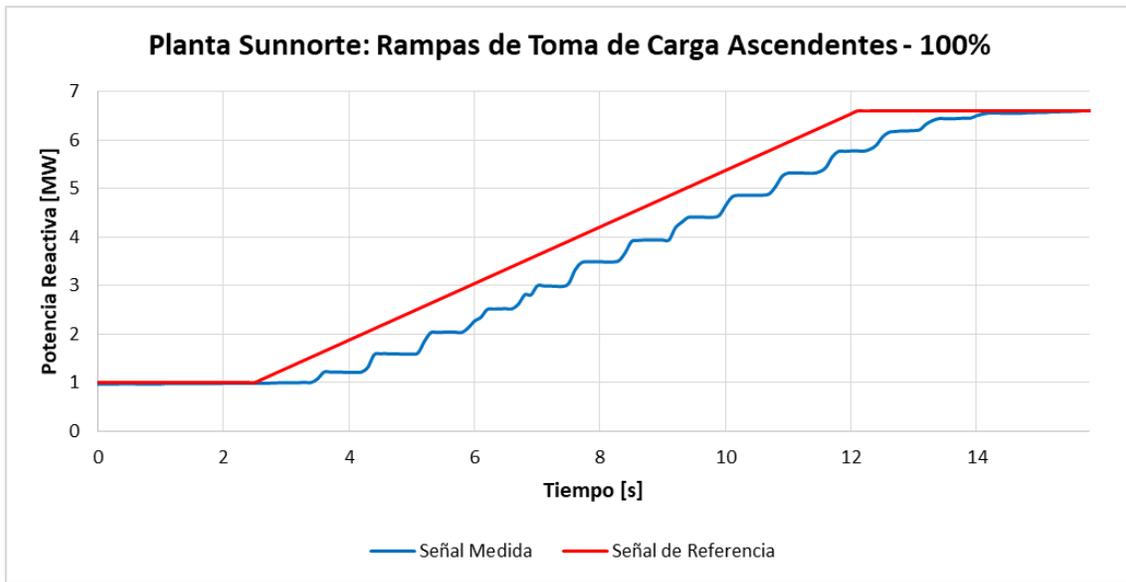


Figura 79. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

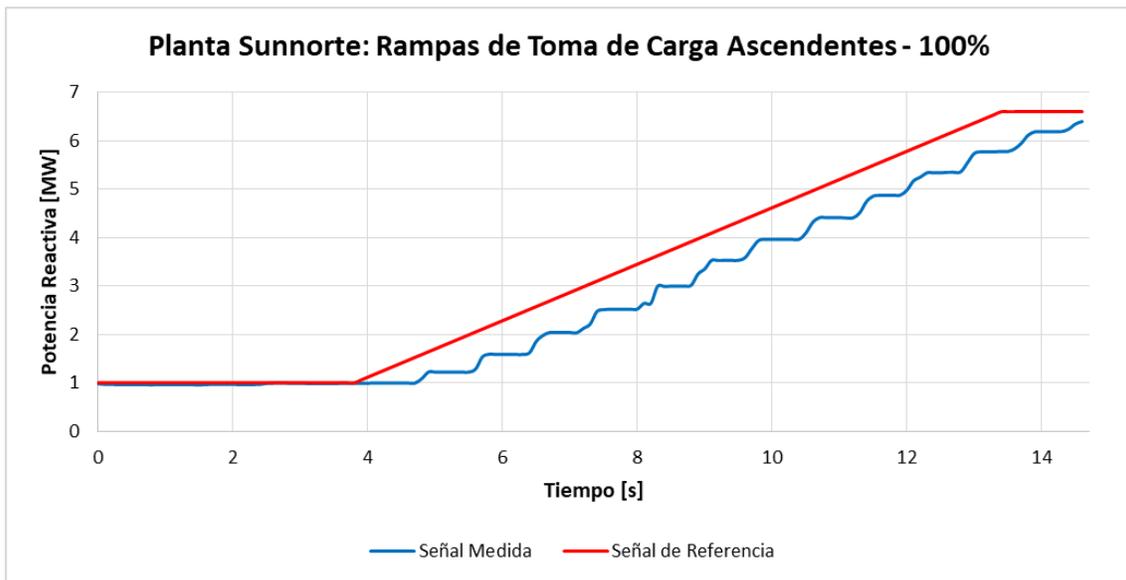


Figura 80. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

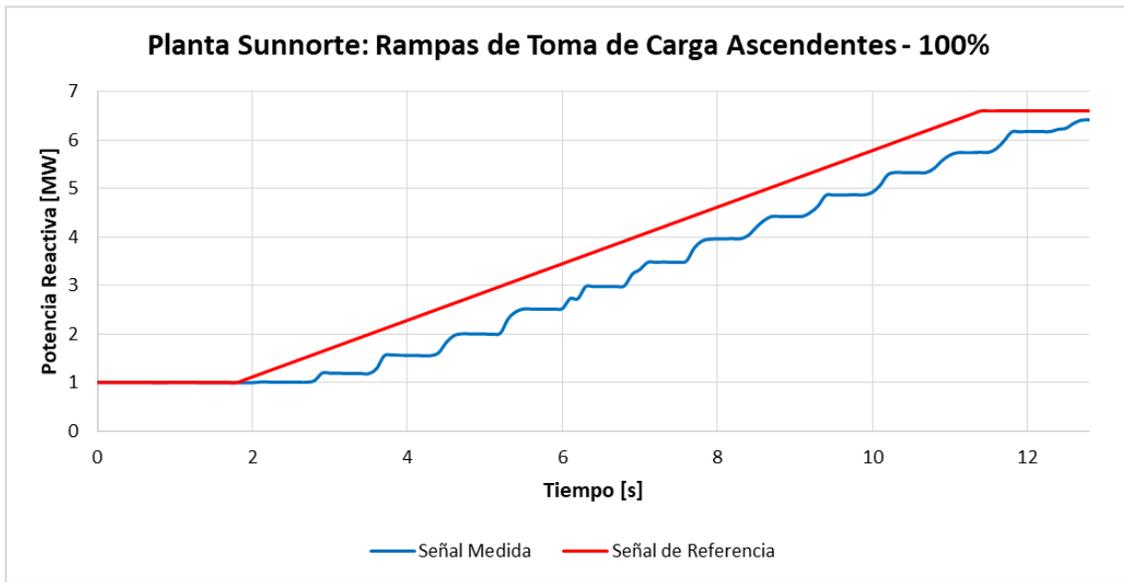


Figura 81. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba toma de carga – Rampa 100% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

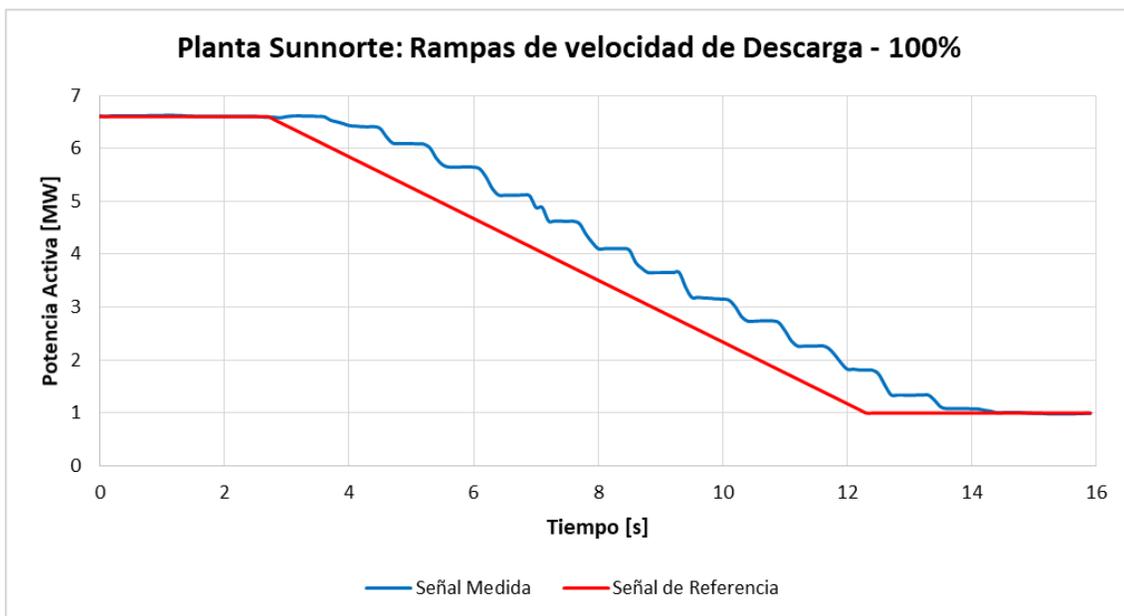


Figura 82. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 1 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

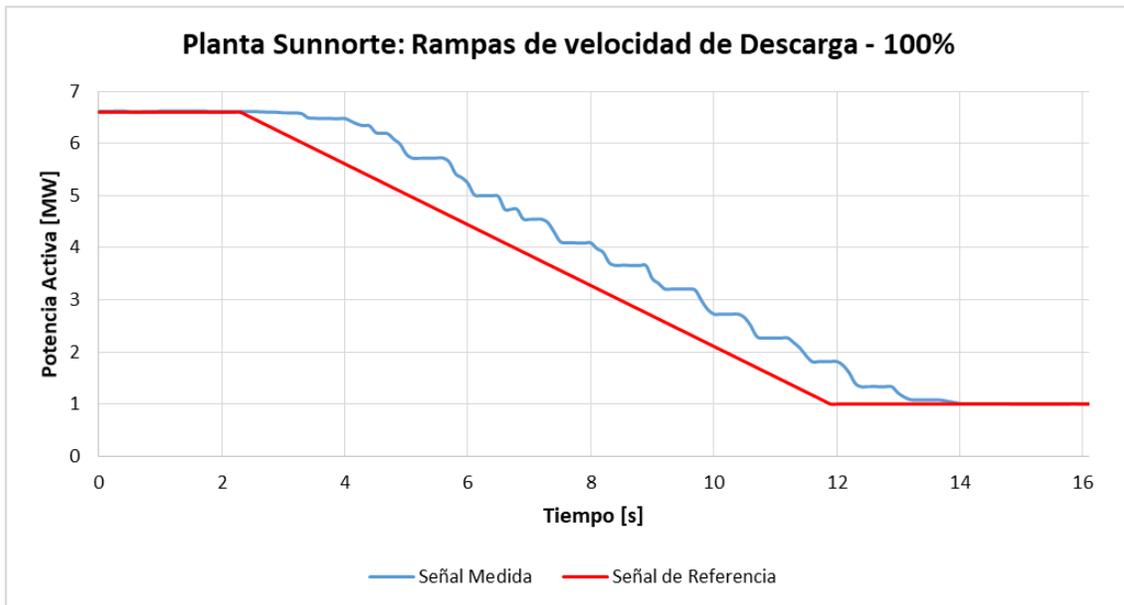


Figura 83. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 2 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

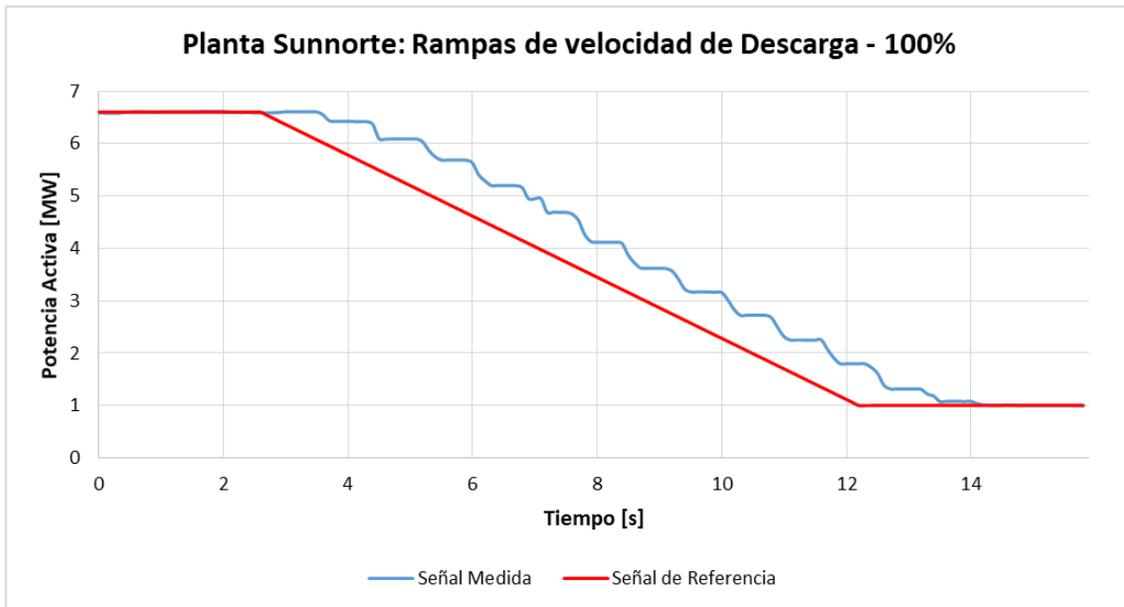


Figura 84. . Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 3 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

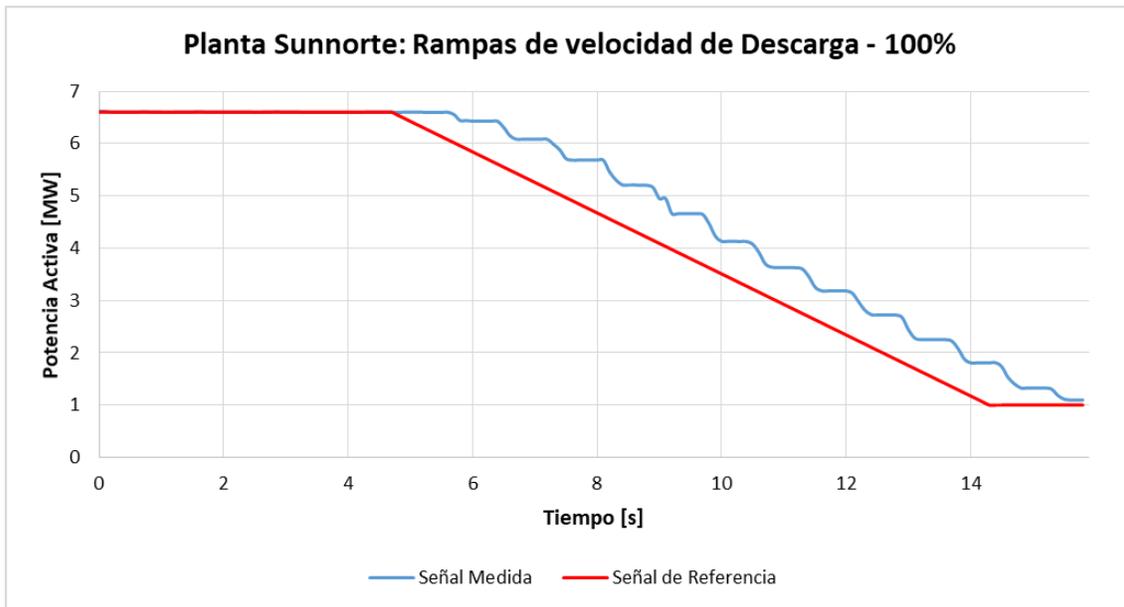


Figura 85. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 4 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo

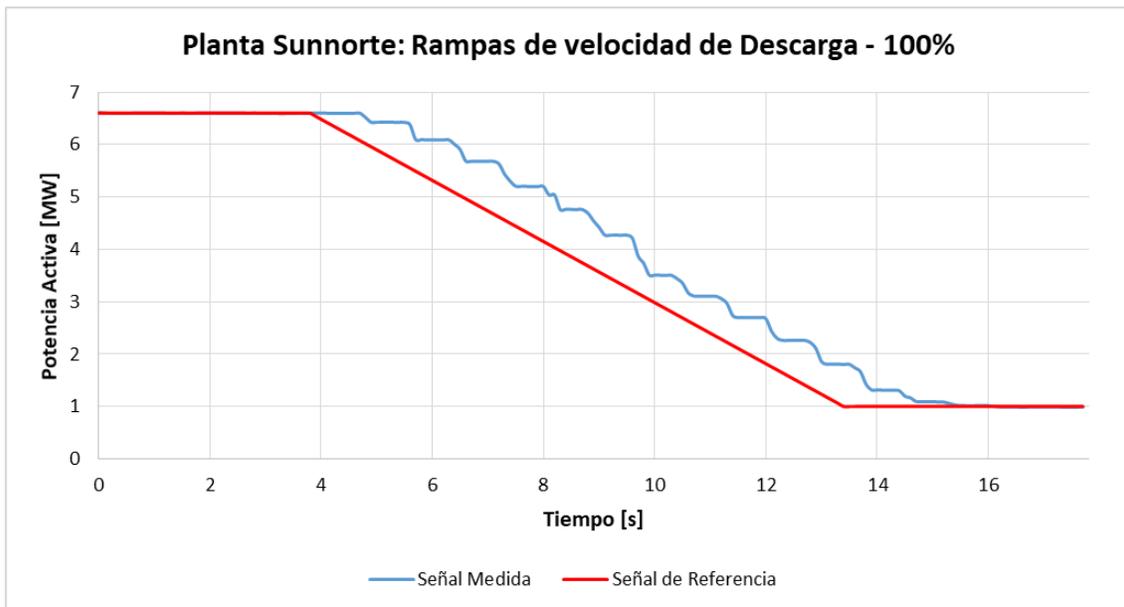


Figura 86. Acuerdo C.N.O 1741 - Prueba velocidad de descarga – Rampa 100% - Escalón 5 - Potencia activa en el Punto de Conexión vs Tiempo.

9. CONCLUSIONES

Estatismo

De los resultados obtenidos, se observa que el valor promedio del estatismo de todos los ensayos realizados con un estatismo configurado del 4% corresponde a 4,1203% con un tiempo de respuesta y de establecimiento de 0,4139 s y 4,75 s respectivamente. Se concluye que el estatismo responde al valor ajustado en el controlador de frecuencia/potencia activa con tiempos óptimos de respuesta y de establecimiento. Además, se evidencia que el rango ajustable del estatismo es entre 2% y 6%.

Banda Muerta

Se puede concluir con base en los resultados, que el margen de operación de la banda muerta responde al valor ajustado en el controlador frecuencia/potencia activa, el cual es de 30 mHz. Además, se observa que el rango operativo de la banda muerta es entre 0 mHz y 120mHz.

Recepción de consignas de forma local

De los resultados obtenidos del protocolo 2, se concluye que la planta responde de manera exitosa ante consignas de potencia activa realizadas de forma local.

Rampas operativas de arranque y parada

Con base en los resultados, se muestra que las pruebas de las rampas operativas presentan valores de coeficiente de variación y de error menores al 15% y al 2% respectivamente, por lo que se concluye que el valor de la rampa responde al valor ajustado en el controlador de frecuencia/potencia activa.

10. REFERENCIAS

[1] Resolución CREG 060 de 2019

[2] C.N.O, Acuerdo 1612 , Por el cual se aprueba la actualización del "Procedimiento para la puesta en operación de proyectos de transmisión que incluyan activos de uso del Sistema de Transmisión Nacional - STN -, del Sistema de Transmisión Regional - STR –, de usuarios conectados directamente al STN, al STR y de recursos de generación", Septiembre 2022

[3] C.N.O, Acuerdo 1741, Por el cual se aprueba la actualización del "Procedimiento de pruebas de las características del control de potencia activa/frecuencia de las plantas eólicas y solares fotovoltaicas conectadas al STN y STR", Agosto 2023