

## **Mantenimiento Hidráulicas.**

*Alpuy, Isaurralde, Larrosa, Reyes y Sica.*

*Instituto de Ingeniería Eléctrica – FING.  
Trabajo final curso SimSEE edición 2017  
Montevideo - Uruguay.*

IMPORTANTE: Este trabajo se realizó en el marco del curso Simulación de Sistemas de Energía Eléctrica (SimSEE) y fue evaluado por el enfoque metodológico, la pericia en la utilización de las herramientas adquiridas en el curso para la resolución del estudio y por la claridad de exposición de los resultados obtenidos. Se quiere dejar expresamente claro que no es relevante a los efectos del curso la veracidad de las hipótesis asumidas por los estudiantes y consecuentemente la exactitud o aplicabilidad de los resultados. Ni la Facultad de Ingeniería, ni el Instituto de Ingeniería Eléctrica, ni el o los docentes, ni los estudiantes asumen ningún tipo de responsabilidad sobre las consecuencias directas o indirectas que asociadas al uso del material del curso y/o a los datos, hipótesis y conclusiones del presente trabajo.

### **1 Objetivo.**

Encontrar para las centrales hidráulicas de: Bonete, Baygorria y Palmar el momento óptimo para realizar el mantenimiento de las turbinas, para ellos se consideró que el tiempo de reparación podía ser de 3, 6 o 12 meses. Verificando que se puede abastecer la potencia demanda durante el periodo de mantenimiento, evaluar si el mantenimiento se va a hacer el próximo año, dentro de 5 o 10 años.

### **2 Hipótesis de trabajo.**

Se asume que la sala de largo plazo (LP\_curso2017\_.zip<sup>1</sup>) y la de corto plazo correspondiente a la semana 26 del presente año (Programación semanal 26/17: del 24 al 30 de Junio de 2017<sup>2</sup>) son válidas para el estudio a realizar..

Consideramos que UPM-2 entra en funcionamiento en el año 2021 y requiere un erogado mínimo de 65 m<sup>3</sup>/s.

---

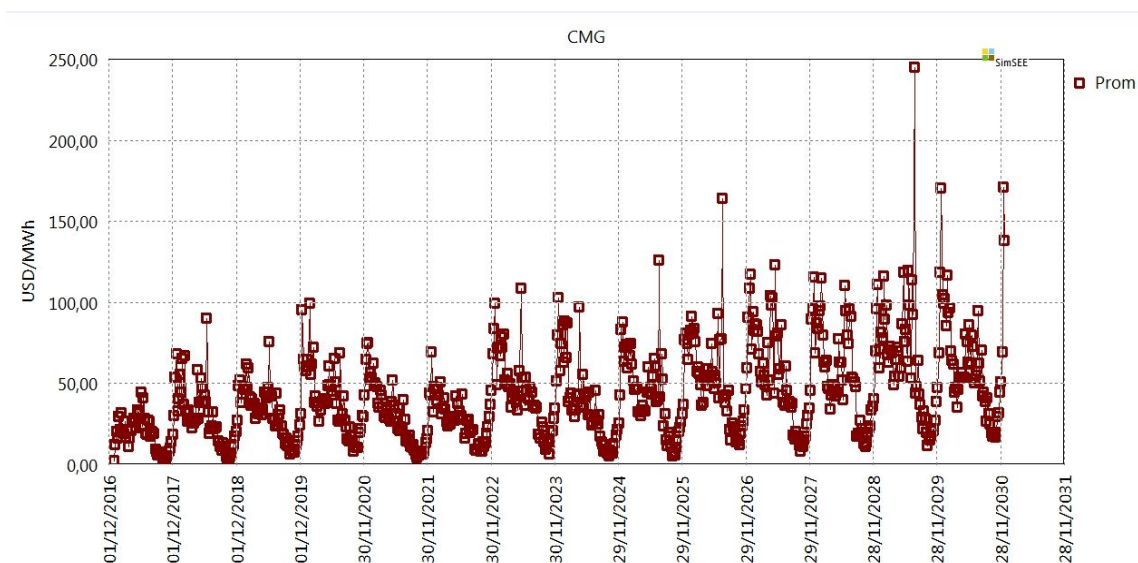
<sup>1</sup> [http://simsee.org/simsee/curso2017/LP\\_curso2017\\_.zip](http://simsee.org/simsee/curso2017/LP_curso2017_.zip)

<sup>2</sup> [http://adme.com.uy/db-docs/Docs\\_secciones/nid\\_793/sem\\_2017N26NSLLNSE.zip](http://adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_793/sem_2017N26NSLLNSE.zip)

### 3 Metodología.

#### Determinación de las fechas de mantenimiento

De una sala y un escenario de largo plazo, donde todas las centrales hidroeléctricas se encuentran disponibles se extrae el costo marginal promedio, luego se estudian los datos de dicha curva a los efectos de encontrar el costo mínimo de operación, donde resultaría más conveniente realizar el mantenimiento:



Para poder ubicar la fecha óptima de comienzo del mantenimiento se consideró la suma del costo marginal semanal en una ventana de duración de 3 y 6 meses; se buscó el costo mínimo, el cual corresponde a la fecha óptima para el mantenimiento en cada caso.

Se obtuvieron las siguientes fechas:

Tiempo de mantenimiento \ Año a realizar.	2018	2023	2028
Trimestral	26 de Agosto	27 de Agosto	27 de Agosto
Semestral	24 de Junio	11 de Junio	30 de Julio
Anual	1 de enero	1 de enero	1 de enero

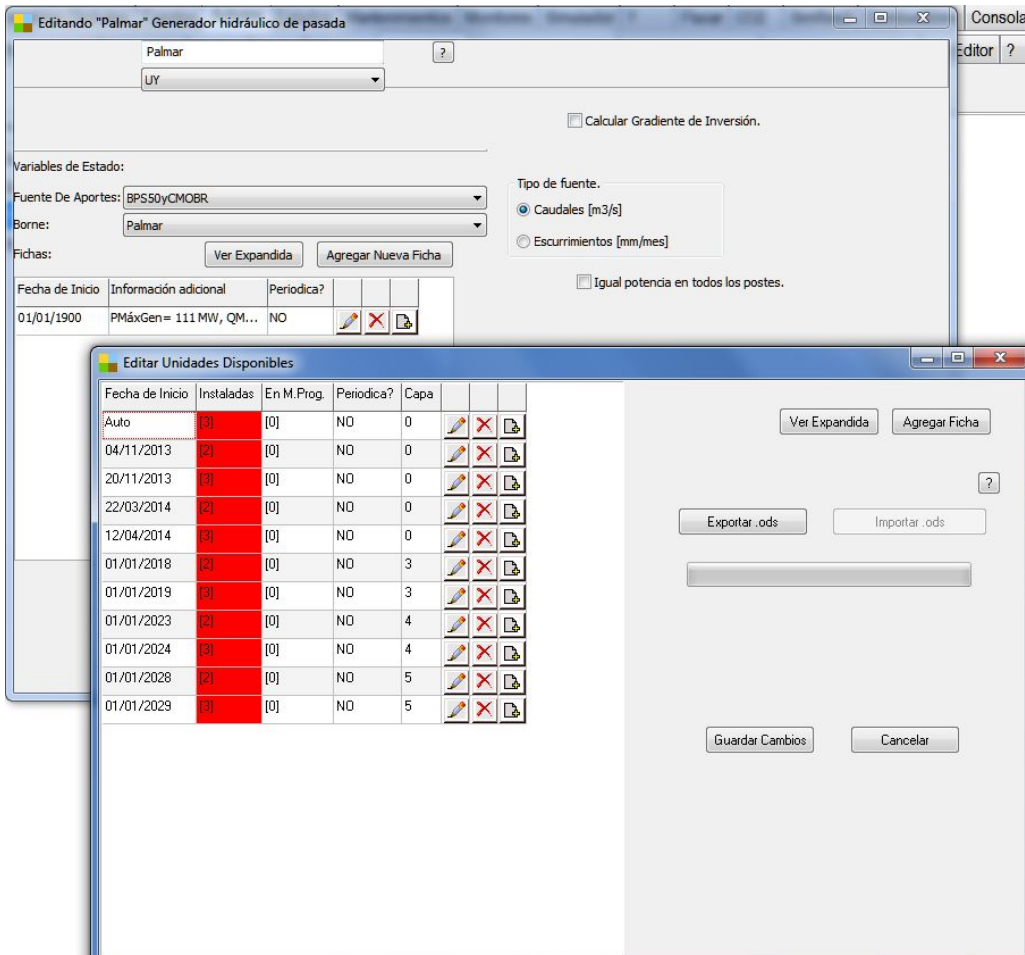
En el caso de mantenimiento realizado en un período anual, se tomaron como fecha de inicio el 1 de enero, a los efectos que la indisponibilidad de la máquina quede en un año lectivo, dentro de los años solicitada.

### Determinación de escenarios de trabajos, y Actores

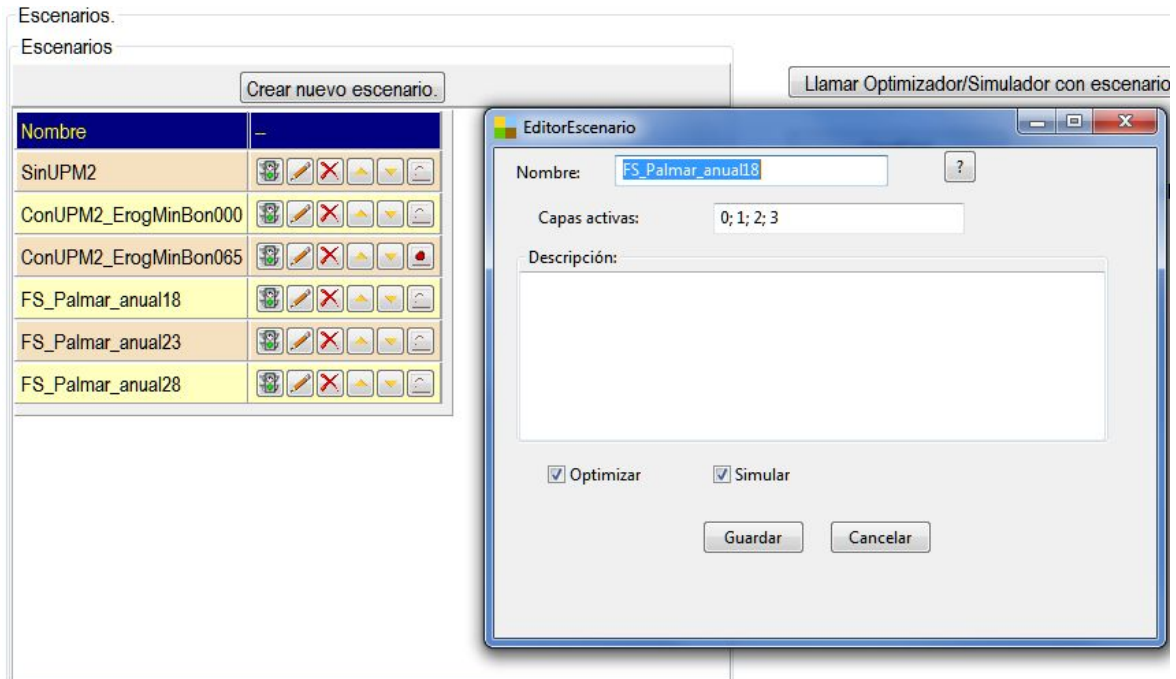
Para poder fijar el mantenimiento de las centrales hidráulicas se editaron las fichas de los actores, reduciendo la cantidad de unidades disponibles a la fecha de inicio del mantenimiento y restableciéndola al finalizar.

Para agilizar la simulación se le asignó en cada caso a los mantenimientos de cada año (2018, 2023, 2028) una capa la cual se activará según el escenario.

De esta manera se generaron 9 salas, correspondientes a la indisponibilidad por mantenimiento de una máquina de la 3 represas (Bonete, Palmar y Baygorria), en los diferentes períodos de mantenimiento 3, 6 y 12 meses (una sala por período), además se crearon dentro de cada sala 3 escenarios de mantenimiento correspondiente a los años 2018, 2023 y 2028, que fueron los años tomados como hipótesis para realizar el mantenimiento.



*Recorte de imagen de ejemplo de capas creadas para el caso del mantenimiento anual en la represa de Palmar.*



*Recorte de imagen de los diferentes escenarios, y las diferentes capas de simulación.*

### **Cambio de semilla de simulación**

A los efectos de estudiar la confiabilidad del resultado obtenido, también se realizaron corridas de estas salas con sus diferentes escenarios utilizando más semillas en la simulación.

Las semillas utilizadas fueron: 31, 1031, 2031, 4031, 5031 y 6031, evaluando el Valor Esperado del Costo Futuro y la desviación estándar para todo los casos.

De este último estudio también se puede discutir cuando es el mejor momento para realizar el mantenimiento, dentro de los años de hipótesis con las fechas propuestas.

### **Años más lluviosos, menos lluviosos y años medios en una sala de largo plazo**

Considerando el Índice de Hidraulicidad Anual, se simuló un año normal (sin sacar maquinas de servicio) y se extrajo la matriz de datos con el SimRes3, a los efectos de obtener los datos crudos de las 100 cronicas simuladas para esta variable.

Luego para cada año de estudio 2018, 2023 y 2028 se ordenaron estas crónicas de acuerdo al Índice de Hidraulicidad Anual, de esa forma se obtienen los números de crónicas ordenados de menos lluvioso a más lluvioso para ese año.

También se extrajo la matriz de datos para el CAD Anual Actualizado sin sacar fuera de servicio ninguna máquina, reordenando estas crónicas según el orden obtenido para el Índice de Hidraulicidad Anual, de esta forma nos quedan ordenadas las crónicas del CAD Anual Actualizado de menos lluvioso a más lluvioso, esto se realizó para cada año de estudio.

Luego para cada año según el orden establecido anteriormente se tomaron los CAD anuales actualizados y acumulados para cada crónica; el promedio de los primeros 10 CAD anuales acumulados da un CAD anual acumulado para las crónicas más secas en el año en cuestión, el promedio de los últimos 10 CAD anuales acumulados da un CAD anual acumulado para las crónicas más lluviosas en el año en cuestión y por último, el promedio de los 10 CAD anuales acumulados del medio da un CAD anual acumulado para las crónicas que no fueron ni tan lluviosas ni tan secas en el año en cuestión.

De esta forma se obtiene un CAD anual actualizado y acumulado para el caso en que se de un año seco, medio o lluvioso en 2018, 2023 y 2028, un total de 9 valores.

Se realiza el mismo cálculo para el caso en que se de un año seco, medio o lluvioso en 2018, 2023 y 2028 pero ahora sacando una máquina fuera de servicio en cada año, de esta forma se vuelven a obtener 9 valores que se comparan con los 9 valores obtenidos sin sacar ninguna máquina fuera de servicio.

De esta forma para fijar ideas, tomemos por ejemplo un año 2018 lluvioso, se puede comparar el CAD anual actualizado y acumulado de ese año con y sin una máquina.

Este procedimiento sólo se realizó para el caso de la Represa Hidroeléctrica de Bonete.

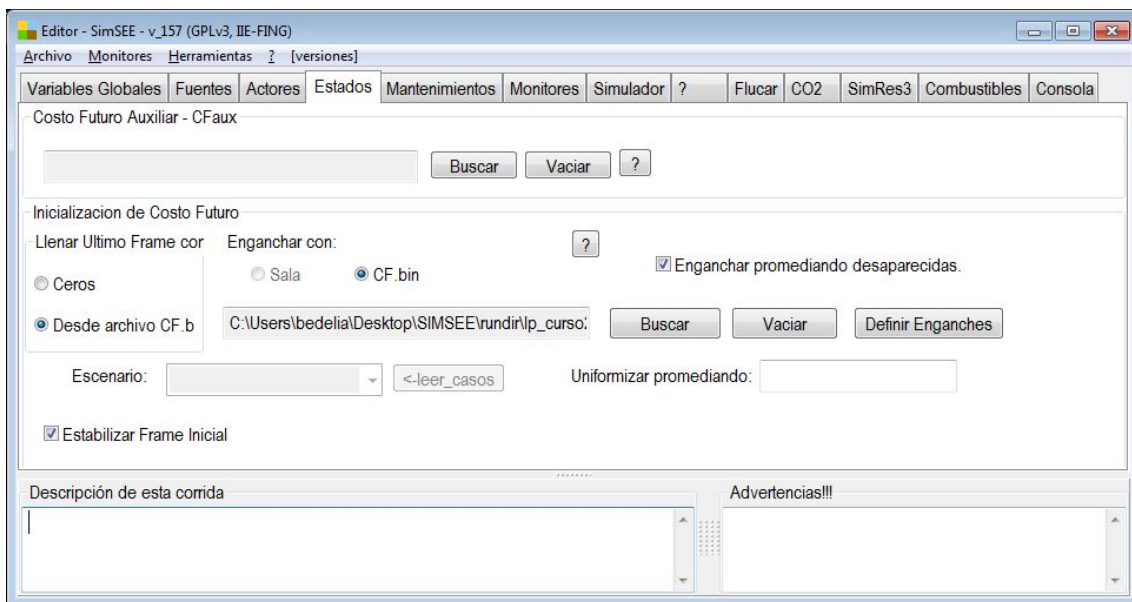
### **Estudio de corto plazo**

Se decidió realizar un estudio de corto plazo para determinar si la salida de servicio de una máquina implica que no se pueda abastecer la potencia demandada en un determinado momento.

Para esto se utilizó la última sala semanal publicada en la página web de ADME.

Para encadenar la sala de corto plazo con la sala de largo plazo analizada anteriormente, se cargó en la primera el costo futuro obtenido en la optimización de largo plazo para el caso base.

Esto se hace cargando un archivo .bin tal como se muestra en la siguiente captura.



## 4 Resultados del estudio.

Se obtuvo el CF\_VE que es la suma del CAD anual actualizado y acumulado con el CF al final del período de simulación, a continuación se presentan las tablas con estos datos:

Bonete- anual							
semilla	Base	Anual 18	Anual 18-Base	Anual 23	Anual 23-Base	Anual 28	Anual 28-Base
31	6894,17	6897,45	3,28	6895	0,83	6896,75	2,58
1031	6882,28	6885,35	3,07	6885,16	2,88	6885,66	3,38
2031	6900,44	6904,1	3,66	6903,59	3,15	6903,95	3,51
3031	6858,73	6861,98	3,25	6860,47	1,74	6861,24	2,51
4031	6889,18	6891,41	2,23	6891,68	2,5	6892,43	3,25
5031	6899,68	6902,67	2,99	6902,43	2,75	6902,76	3,08
6031	6926,94	6930,3	3,36	6930,1	3,16	6930,62	3,68
		VE=	3,12		2,43		3,14
		Desv-Std=	0,45		0,86		0,45
Bonete- semestral							
semilla	Base	Semestral 18	Semestral 18-Base	Semestral 23	Semestral 23-Base	Semestral 28	Semestral 28-Base
31	6894,17	6895,11	0,94	6893,77	-0,4	6895,98	1,81
1031	6882,28	6883,91	1,63	6883,04	0,76	6884,67	2,39
2031	6900,44	6901,24	0,8	6902,22	1,78	6902,05	1,61
3031	6858,73	6859,19	0,46	6858,24	-0,49	6859,84	1,11
4031	6889,18	6890,71	1,53	6889,44	0,26	6890,96	1,78
5031	6899,68	6900,42	0,74	6900,36	0,68	6902,54	2,86
6031	6926,94	6927,64	0,7	6928,69	1,75	6928,94	2
		VE=	0,97		0,62		1,94
		Desv-Std=	0,44		0,92		0,56
Bonete- trimestral							
semilla	Base	Trimestral 18	Trimestral 18-Base	Trimestral 23	Trimestral 23-Base	Trimestral 28	Trimestral 28-Base
31	6894,17	6894,17	0	6894,32	0,15	6894,24	0,07
1031	6882,28	6882,99	0,71	6882,75	0,47	6882,48	0,2
2031	6900,44	6900,92	0,48	6902,01	1,57	6900,85	0,41
3031	6858,73	6857,99	-0,74	6857,94	-0,79	6858,19	-0,54
4031	6889,18	6889,31	0,13	6889,29	0,11	6889,24	0,06
5031	6899,68	6900,34	0,66	6900,34	0,66	6900,07	0,39
6031	6926,94	6927,21	0,27	6927,32	0,38	6927,24	0,3
		VE=	0,22		0,36		0,13
		Desv-Std=	0,50		0,71		0,33

Palmar - anual							
semilla	Base	Anual 18	Anual 18-Base	Anual 23	Anual 23-Base	Anual 28	Anual 28-Base
31	6894,17	6897,64	3,47	6897,19	3,02	6899,12	4,95
1031	6882,28	6886,63	4,35	6885,86	3,58	6886,69	4,41
2031	6900,44	6904,37	3,93	6904,58	4,14	6905,92	5,48
3031	6858,73	6863,8	5,07	6862,58	3,85	6862,97	4,24
4031	6889,18	6893,73	4,55	6892,13	2,95	6893,9	4,72
5031	6899,68	6903,74	4,06	6904,22	4,54	6904	4,32
6031	6926,94	6932	5,06	6930,35	3,41	6932,45	5,51
		VE=	4,36		3,64		4,80
		Desv-Std=	0,59		0,58		0,53
Palmar - semestral							
semilla	Base	Semestra I 18	Semestra I 18-Base	Semestra I 23	Semestra I 23-Base	Semestra I 28	Semestral 28-Base
31	6894,17	6896,19	2,02	6896,46	2,29	6896,14	1,97
1031	6882,28	6884,29	2,01	6884,1	1,82	6884,69	2,41
2031	6900,44	6902,05	1,61	6902,96	2,52	6902,98	2,54
3031	6858,73	6861,71	2,98	6861,06	2,33	6861,22	2,49
4031	6889,18	6890,37	1,19	6890,43	1,25	6891,49	2,31
5031	6899,68	6902,19	2,51	6902,4	2,72	6902,57	2,89
6031	6926,94	6928,86	1,92	6928,96	2,02	6929,7	2,76
		VE=	2,03		2,14		2,48
		Desv-Std=	0,58		0,49		0,30
Palmar - trimestral							
semilla	Base	Trimestra I 18	Trimestra I 18-Base	Trimestra I 23	Trimestra I 23-Base	Trimestra I 28	Trimestral 28-Base
31	6894,17	6894,41	0,24	6894,54	0,37	6894,22	0,05
1031	6882,28	6882,99	0,71	6883,01	0,73	6882,65	0,37
2031	6900,44	6901,07	0,63	6901,33	0,89	6900,92	0,48
3031	6858,73	6859,42	0,69	6858,76	0,03	6858,92	0,19
4031	6889,18	6889,6	0,42	6889,28	0,1	6889,45	0,27
5031	6899,68	6900,12	0,44	6900,13	0,45	6900,1	0,42
6031	6926,94	6927,73	0,79	6927,62	0,68	6927,27	0,33
		VE=	0,56		0,46		0,30
		Desv-Std=	0,20		0,32		0,15



Baygorria- anual							
semilla	Base	Anual 18	Anual 18-Base	Anual 23	Anual 23-Base	Anual 28	Anual 28-Base
31	6894,17	6897,04	2,87	6896,51	2,34	6896,4	2,23
1031	6882,28	6884,74	2,46	6884,79	2,51	6885,18	2,9
2031	6900,44	6903,52	3,08	6903,05	2,61	6903,12	2,68
3031	6858,73	6861,27	2,54	6860,45	1,72	6861,42	2,69
4031	6889,18	6892,05	2,87	6891,63	2,45	6891,76	2,58
5031	6899,68	6903,04	3,36	6902,31	2,63	6903,04	3,36
6031	6926,94	6930,07	3,13	6929,55	2,61	6929,47	2,53
		VE=	2,90		2,41		2,71
		Desv-Std=	0,32		0,32		0,35
Baygorria- semestral							
semilla	Base	Semestral 18	Semestral 18-Base	Semestral 23	Semestral 23-Base	Semestral 28	Semestral 28-Base
31	6894,17	6894,56	0,39	6894,57	0,4	6895,27	1,1
1031	6882,28	6883,22	0,94	6882,76	0,48	6883,9	1,62
2031	6900,44	6901,2	0,76	6901,09	0,65	6901,75	1,31
3031	6858,73	6859,56	0,83	6859,07	0,34	6859,95	1,22
4031	6889,18	6890,44	1,26	6889,67	0,49	6890,51	1,33
5031	6899,68	6900,84	1,16	6900,65	0,97	6902,05	2,37
6031	6926,94	6928,29	1,35	6927,87	0,93	6928,43	1,49
		VE=	0,96		0,61		1,49
		Desv-Std=	0,33		0,25		0,42
Baygorria- trimestral							
semilla	Base	Trimestral 18	Trimestral 18-Base	Trimestral 23	Trimestral 23-Base	Trimestral 28	Trimestral 28-Base
31	6894,17	6894,36	0,19	6894,3	0,13	6898,14	3,97
1031	6882,28	6882,14	-0,14	6882,05	-0,23	6886,11	3,83
2031	6900,44	6900,66	0,22	6900,7	0,26	6904,84	4,4
3031	6858,73	6859,41	0,68	6858,99	0,26	6863,11	4,38
4031	6889,18	6888,85	-0,33	6889,24	0,06	6893,85	4,67
5031	6899,68	6900,03	0,35	6900,26	0,58	6905,4	5,72
6031	6926,94	6926,51	-0,43	6926,82	-0,12	6931,44	4,5
		VE=	0,08		0,13		4,50
		Desv-Std=	0,40		0,27		0,62

Se puede observar en rojo aquellas columnas en las que el valor esperado de la diferencia entre el CF\_VE sin sacar máquinas y el CF\_VE sacando máquinas es menor, en algunos casos se consideró la desviación estándar para determinar el mejor escenario no teniendo en cuenta en ese caso, el valor esperado.

Se puede concluir entonces que es más conveniente poner máquinas en mantenimiento para las diferentes represas en los siguientes momentos:

**Bonete:**

- Tanto para mantenimientos semestrales como anuales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2023.
- Para mantenimientos trimestrales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2028.

**Palmar:**

- Para mantenimientos trimestrales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2028.
- Para mantenimientos semestrales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2018.
- Para mantenimientos anuales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2023.

**Baygorria:**

- Tanto para mantenimientos semestrales como anuales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2023.
- Para mantenimientos trimestrales, es conveniente realizar el mantenimiento en 2018.

**Años más lluviosos, menos lluviosos y años medios en una sala de largo plazo**

Para el caso de la represa Bonete, realizando el procedimiento descrito se obtuvo la siguiente tabla que corresponde al CAD anual actualizado y acumulado sin sacar ninguna máquina para los años 2018, 2023 y 2028 considerando tres escenarios de hidraulicidad para cada año.

CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas (M USD)	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso
2018	5350,063	5290,774	5380,339
2023	5555,396	2357,693	5182,699
2028	5400,017	5387,369	5340,428

Sacando una máquina fuera de servicio de forma anual, en los años de la tabla anterior, la misma queda de la siguiente forma:

CAD anual actualizado y acumulado	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso

quitando 1 máquina por 1 año (M USD)			
2018	5352,970	5297,748	5381,939
2023	5554,688	5359,798	5184,524
2028	5405,649	5389,994	5342,892

Si comparamos la tabla del CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas con la tabla sacando una máquina por un año, obtenemos la siguiente tabla:

(CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas) - (CAD anual actualizado y acumulado quitando 1 máquina por 1 año) (M USD)	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso
2018	2,907	6,974	1,600
2023	-0,708	2,105	1,825
2028	5,633	2,625	2,464

Sacando una máquina fuera de servicio de forma semestral, se obtiene la siguiente tabla:

CAD anual actualizado y acumulado quitando 1 máquina por 1 semestre (M USD)	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso
2018	5350,233	5294,002	5380,757
2023	5555,126	5358,349	5182,958
2028	5400,637	5390,443	5340,772

Si comparamos la tabla del CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas con la tabla sacando una máquina por un semestre, obtenemos la siguiente tabla:

(CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas) - (CAD anual actualizado y acumulado quitando 1 máquina por 1 semestre) (M USD)	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso
2018	0,169	3,228	0,418
2023	-0,271	0,655	0,259
2028	0,620	3,073	0,343

Sacando una máquina fuera de servicio de forma trimestral, se obtiene la siguiente tabla:

CAD anual actualizado y acumulado quitando 1 máquina por 1 trimestre (M USD)	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso
2018	5350,324	5288,616	5379,583
2023	5549,498	5359,011	5182,516
2028	5402,453	5387,582	5340,732

Si comparamos la tabla del CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas con la tabla sacando una máquina por un trimestre, obtenemos la siguiente tabla:

(CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas) - (CAD anual actualizado y acumulado	Año Seco	Año Medio	Año Lluvioso
--	----------	-----------	--------------

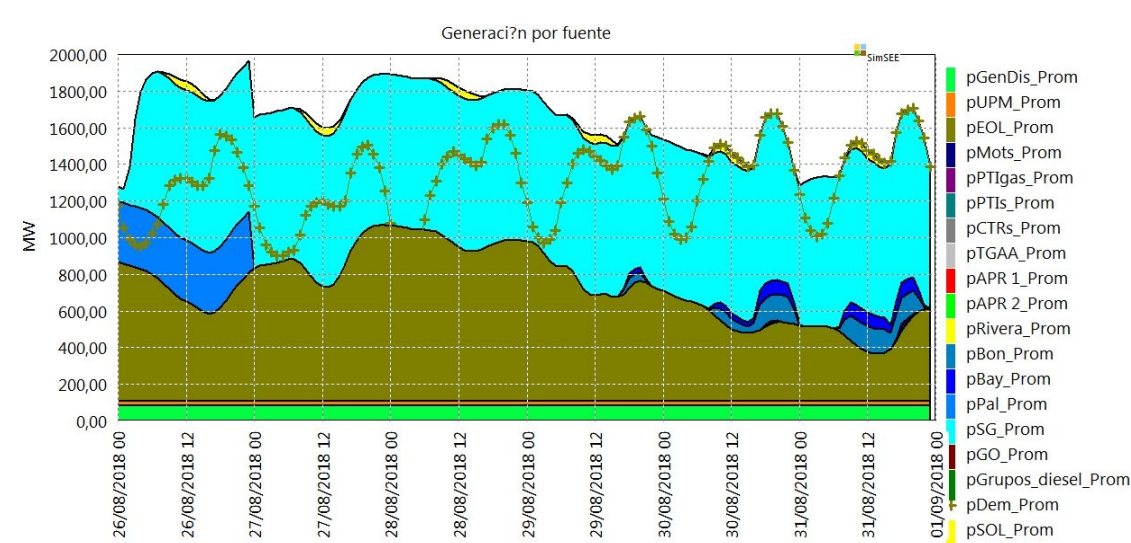
quitando 1 máquina por 1 trimestre) (M USD)			
2018	0,260	-2,157	-0,755
2023	-5,899	1,318	-0,183
2028	2,436	0,219	0,304

De las tablas de comparación del CAD anual actualizado y acumulado con todas las máquinas presentes y el CAD anual actualizado y acumulado sacando máquinas se puede ver marcados en rojo los años y condiciones de hidraulicidad que minimizan el costo de poner una máquina en mantenimiento, sin embargo no se observa una correlación entre el índice de hidraulicidad anual y sacar una máquina de forma trimestral, semestral o anual. Por esto, no creemos que sea conveniente guiarse en el índice de hidraulicidad anual para determinar el momento en que debe realizarse un mantenimiento de este tipo, otra hubiese sido la conclusión si hubiéramos obtenido que es más conveniente sacar siempre una máquina en años secos por ejemplo.

### Estudio de corto plazo

En un principio se realizó la simulación de corto plazo poniendo en mantenimiento una de las máquinas de Palmar en el período objetivo, y dado que no hubo falla se decidió poner en mantenimiento toda la central (333 MW) para analizar qué tan lejos de la falla estábamos.

Para esta última simulación se obtuvo el siguiente despacho:

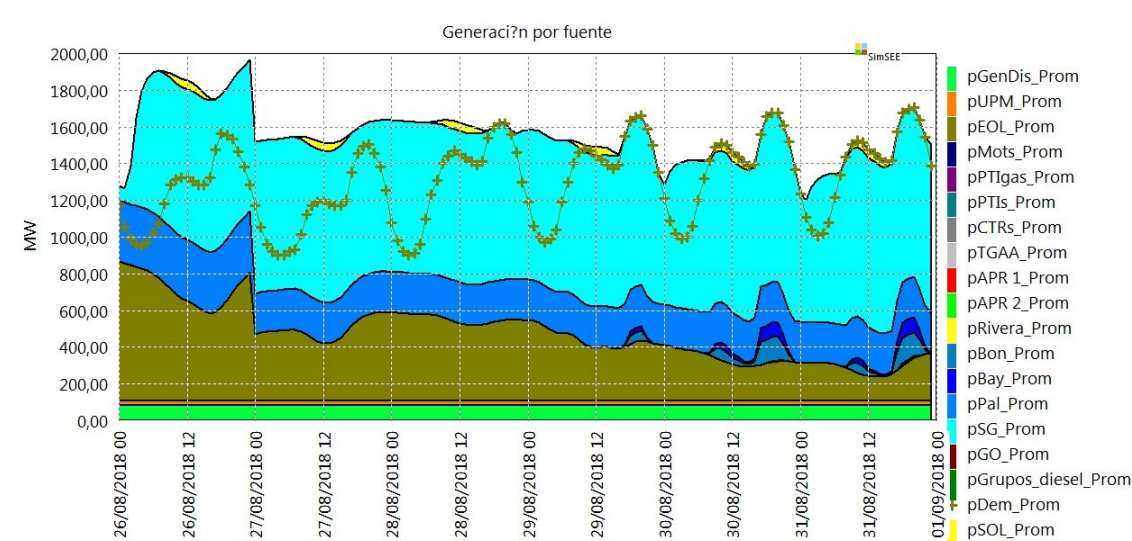


Como se puede observar, la potencia demandada es cubierta (incluso excedida) en todo instante de tiempo, a pesar de no estar la central de Palmar en funcionamiento.

Como la central de Palmar es la de mayor potencia, podemos concluir que lo mismo va a suceder sacando las otras centrales de menor potencia.

Como última prueba, viendo que la potencia faltante es sustituida en parte por potencia eólica, decidimos reducir a la mitad la potencia instalada de fuentes eólicas para tratar de generar un escenario de falla.

El despacho obtenido fue el siguiente:



En este caso tampoco se produce falla, por lo tanto, el despacho de energía simulado en la sala de largo plazo es válido.

## 5 Posibles futuros trabajos.

Se debería realizar todos los estudios para un conjunto mayor de años, no sólo 2018, 2023 y 2028.

Se debería también realizar el estudio de años secos, medios y lluviosos para las represas de Palmar y Baygorria.