

8. ESTUDIO DE LOS CONVERTIDORES DE ENERGÍA DE LAS OLAS

En este capítulo se estudiarán los convertidores de energía de las olas oscilante y de columna de agua. Para el caso del WEC oscilante se estudiará el oscilador cilíndrico de Eriksson (Eriksson, Isberg, and Leijon 2006) y el oscilador esférico de Havelock (Havelock 1955). Para el caso del oscilador de columna de agua se estudiará el modelo de Pereiras (Pereiras, Montoya, Castro, de la Villa, el Marjani, and Rodríguez 2010).

8.1 Estudio del Convertidor de Energía de las Olas Oscilante

Estudio del convertidor de energía de las olas oscilante tiene como finalizada, mediante el control del flujo de potencia en el estado dos, optimizar la potencia de captura del PTO (García, Montoya, and de la Villa Jaén 2010). Para esto se controlará la fuerza que aplica el generador al sistema oscilante. El modelo general adoptado que relaciona la fuerza del generador con el desplazamiento del convertidor es el siguiente:

$$f_{PTO}(t) = -M_{pto}\ddot{x}(t) - B_{pto}\dot{x}(t) - C_{pto}x(t) \quad (8.1)$$

Para simplificar el estudio se asumirá que el coeficiente de la masa del PTO es cero ($M_{pto}=0$), de esta manera la fuerza del generador será

$$f_{PTO}(t) = -B_{pto}\dot{x}(t) - C_{pto}x(t) \quad (8.2)$$

Para garantizar la máxima transferencia de potencia el sistema extractor de potencia debe satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{C_{pto}}{\omega} = -\omega(M + M_a(\omega)) + \frac{C_t + C_{hs}}{\omega} \quad (8.3)$$

$$B_{pto} = B_r(\omega) + B_p \quad (8.4)$$

Considerando un sistema sin pérdidas mecánicas con oleaje regular de frecuencia ω_0 , el ajuste sobre las constantes B_{pto} y C_{pto} debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$C_{pto} = \omega_0^2(M + M_a(\omega_0)) - C_t - C_{hs} \quad (8.5)$$

$$B_{pto} = B_r(\omega_0) \quad (8.6)$$

El coeficiente de proporcionalidad con la velocidad B_{pto} de la fuerza amortiguadora del generador define la potencia que se transfiere del sistema oscilante al PTO y al océano en forma de radiación. En cambio, el coeficiente de proporcionalidad con la posición C_{pto} define la fuerza del generador asociada al fenómeno tenso-elástico que permite la transferencia cíclica, en cada período de la ola, de la potencia no útil entre el PTO y el sistema oscilante.

Si se considera que la fuerza tenso-elástica del generador es cero $C_{pto}=0$, es decir, que no hay transferencia cíclica por período del oleaje de potencia no útil entre el PTO y el sistema oscilante, entonces, la máxima transferencia de potencia entre el oscilador y el PTO ocurre bajo la siguiente condición:

$$B_{pto} = \sqrt{B_r^2(\omega_0) + \left(\omega_0(M + M_a(\omega_0)) - \frac{C_t + C_{hs}}{\omega_0} \right)^2} \quad (8.7)$$

En resumen, en los escenarios analizados se estudiará la máxima transferencia de potencia bajo las siguientes condiciones:

- Si la fuerza del generador es $f_{PTO}(t) = -B_{pto}\dot{x}(t) - C_{pto}x(t)$ entonces la condición (óptima) es:

$$C_{pto} = \omega_0^2(M + M_a(\omega_0)) - C_t - C_{hs} \quad (8.8)$$

$$B_{pto} = B_r(\omega_0) \quad (8.9)$$

- Si la fuerza del generador es $f_{PTO}(t) = -B_{pto}\dot{x}(t)$ entonces la condición (subóptima) es:

$$B_{pto} = \sqrt{B_r^2(\omega_0) + \left(\omega_0(M + M_a(\omega_0)) - \frac{C_t + C_{hs}}{\omega_0} \right)^2} \quad (8.10)$$

8.1.1 Estudio del convertidor de energía de las olas de Eriksson

El primer dispositivo estudiado es el WEC oscilante del trabajo de Eriksson (Eriksson, Isberg, and Leijon 2006) perteneciente al proyecto Lysekil de la Universidad de Uppsala. Se realizarán cálculos teóricos que serán comprobados mediante simulaciones en la plataforma Simulink de Matlab. EL diagrama de bloques del sistema simulado se presenta en la figura 8.1.

la corriente i_{sd} las constantes se han ajustado a $k_p=1000$ y $k_i=50$ y para el control de la corriente i_{sq} se han ajustado a $k_p=750$ y $k_i=1000$.

Tab. 8.2: Datos del subsistema eléctrico (generador, VSC y carga) de Lysekil

Potencia Nominal	10 kW
Velocidad Nominal	0.7 m/s
Tensión de línea	200 V
Paso polar (τ_p)	50 mm
Inductancia síncrona	7.8 mH
Resistencia del estator	0.45 Ω
Flujo magnético	4.15 Wb
Capacitancia DC	1 F

Para los escenarios de análisis se asume un oleaje regular de período 3.89 s y altura 0.36 m. El sistema, para la frecuencia del oleaje anterior, tiene un coeficiente de excitación $W=45890$ N/m, una resistencia de radiación $B_r=4700$ kg/s y una masa agregada $M_a=8000$ kg.

Control óptimo del convertidor de energía de las olas de Eriksson

Para el primer escenario de análisis el control óptimo se logra cuando las constantes de la fuerza del generador toman los valores $B_{pto}=4700$ kg/s y $C_{pto}=-52274$ kg/s² respectivamente. Con los datos del oleaje y del coeficiente de excitación puede determinarse la fuerza de excitación senoidal que para todos los escenarios estudiados es $F_e(t)=8260\text{sen}(2\pi t/3.89)$ N.

Dado que la fuerza de excitación es una señal senoidal, el análisis del sistema hidrodinámico puede realizarse mediante la analogía del mismo con los circuitos eléctricos en régimen permanente como se muestra en la figura 8.2

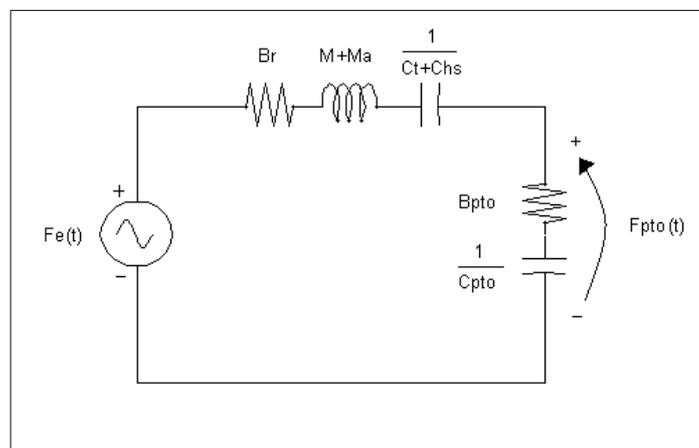


Fig. 8.2: Equivalente circuital del sistema hidrodinámico

Para que ocurra la máxima transferencia de potencia la impedancia del PTO debe ser el complejo conjugado de la impedancia intrínseca, por tanto, la velocidad del convertidor debe estar en fase con la fuerza de excitación y su valor debe ser $v(t)=F_e(t)/2B_r=0.88\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s. La potencia instantánea transferida al PTO en esta condición es la misma que se disipa en el fenómeno de radiación y es igual a $P_{pto}(t)=F_e^2(t)/4B_r=1.8(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con valor promedio $P_{pto}=1.8$ kW.

Para garantizar la máxima transferencia de potencia la corriente $i_{qs}(t)$ debe satisfacer la ecuación 7.29. Para el caso de oleaje regular el máximo de la corriente $i_{qs}(t)$ toma el valor

$$i_{qs}^{max} = \frac{\lambda}{3\pi\Phi_{fd}} \sqrt{\left(\frac{B_{pto}F_e^{max}}{2B_r}\right)^2 + \left(\frac{C_{pto}F_e^{max}T}{2B_r2\pi}\right)^2} \quad (8.11)$$

Para el sistema analizado la corriente máxima es 72 A aproximadamente. La potencia promedio disipada en la resistencia estática puede calcularse mediante la ecuación siguiente:

$$P_s = \frac{3(i_{qs}^{rms})^2 R_s}{2} \quad (8.12)$$

Para el sistema analizado las pérdidas en la resistencia del estator son 1750 W. Es decir, en la condición de máxima transferencia de potencia se puede transferir a la carga sólo 50 W. Para evitar que la tensión en el condensador colapse o crezca indefinidamente la carga de potencia constante debe fijarse en 50 W.

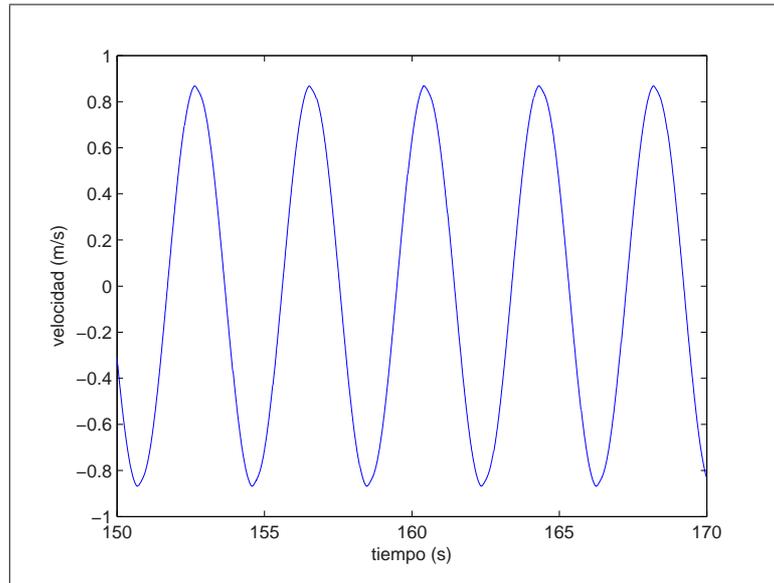


Fig. 8.3: Velocidad del convertidor para la máxima transferencia de potencia

Las gráficas de la velocidad y de la potencia asociada a la fuerza de excitación obtenidas durante la simulación se presentan en las figuras 8.3 y 8.4. En ambas gráficas se puede observar la

máxima velocidad y la potencia promedio descritas anteriormente para la máxima transferencia de potencia.

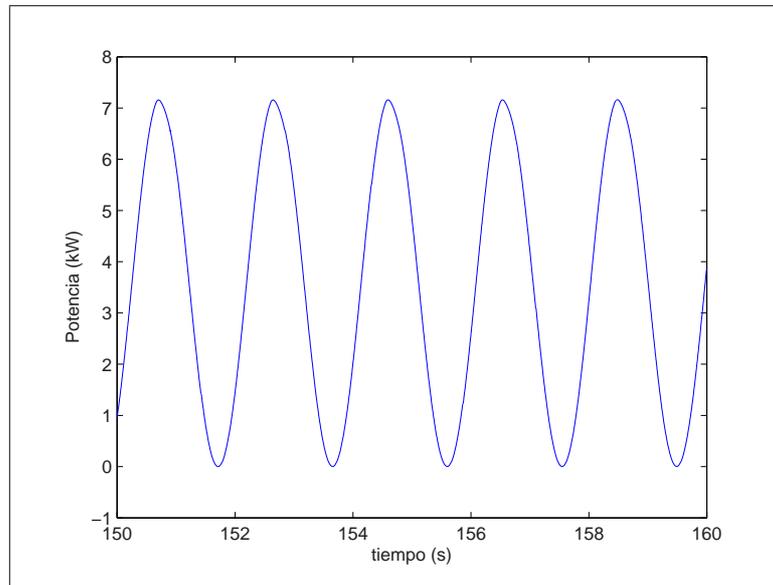


Fig. 8.4: Potencia asociada a la fuerza de excitación para la máxima transferencia de potencia

La reactancia del sistema hidrodinámico está repartida de la siguiente manera: $X_M = \omega(M + M_a) = 14940 \text{ kg/s}$, $X_C = -(C_t + C_{hs})/\omega = -47305 \text{ kg/s}$, $X_{C_{pto}} = -C_{pto}/\omega = 32365 \text{ kg/s}$. La suma de estas reactancias es cero dado que la condición de máxima transferencia de potencia así lo exige.

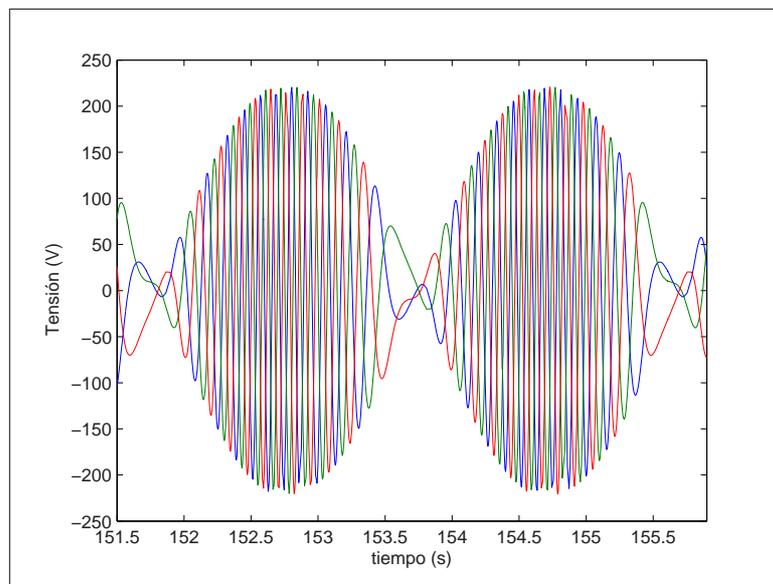


Fig. 8.5: Tensión a la salida del generador lineal

Es importante notar que existe un desbalance considerable entre la reactancia *inductiva* (asociada a la masa) y *capacitiva* (asociada al fenómeno tenso-elástico) del sistema hidro-

dinámico que debe ser suministrada en resonancia por el generador. El balance de potencia reactiva en estos elementos durante la resonancia es el siguiente: $Q_M=V^2X_M=5.8$ kvar, $Q_C=V^2X_C=-18.3$ kvar, $Q_{C_{pto}}=V^2X_{C_{pto}}=12.5$ kvar. Se debe recalcar que mientras el generador intercambia con el sistema hidrodinámico 12.5 kvar por el ajuste de C_{pto} , obtiene del mismo 1.8 kW por el ajuste de B_{pto} . Este desbalance también se refleja en el factor de calidad del generador $Q_{pto}=-C_{pto}/(\omega.B_{pto})=6.9$ respecto al factor de calidad del sistema hidrodinámico $Q_{sistema}=C_{total}/(\omega.B_{total})=1.6$.

Este desbalance de potencia se observa en el análisis del sistema eléctrico asociado. La señal de tensión trifásica a la salida del generador lineal es una señal modulada en amplitud y frecuencia por la señal de velocidad senoidal como se observa en la figura 8.5.

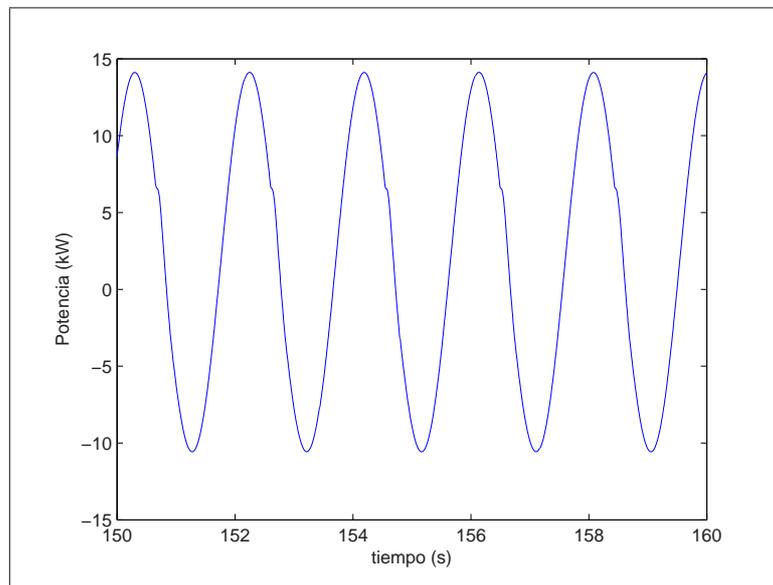


Fig. 8.6: Potencia intercambiada entre el WEC y el PTO

En la figura 8.6 se puede observar la transferencia de potencia entre el WEC y el PTO. La potencia con signo positivo indica que la máquina lineal está trabajando como generador, es decir, el flujo de potencia va desde el convertidor hacia el generador. Por otra parte, la potencia con signo negativo indica que la máquina está trabajando como motor, es decir, el flujo de potencia va desde el motor hacia el convertidor. Como se observa en la gráfica existe un considerable flujo de potencia en ambos sentidos que toma un valor instantáneo máximo de 13.6 kW. La potencia media intercambiada es positiva de valor 1.8 kW, es decir, por ciclo existe un saldo positivo de potencia en el funcionamiento de la máquina como generador.

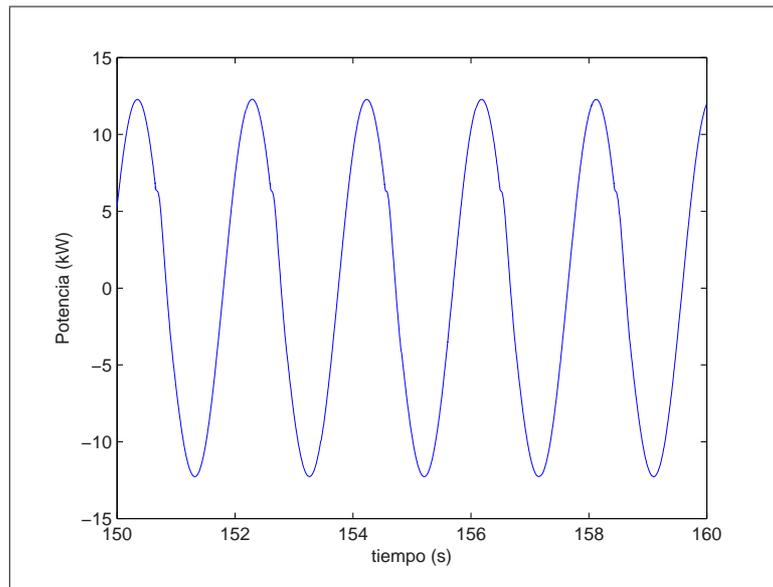


Fig. 8.7: Potencia intercambiada entre el generador lineal y el puente IGBT o fuente controlada de tensión SVC

En la figura 8.7 se puede observar la transferencia de potencia entre el generador lineal y la fuente controlada de tensión SVC (Source Voltage Controlled). Como se observa en la gráfica existe un considerable flujo de potencia en ambos sentidos con valor instantáneo máximo de 11.8 kW con una potencia promedio muy baja de 50 W. Esto indica que prácticamente toda la potencia transferida al SVC cuando la máquina trabaja como generador retorna al convertidor cuando la máquina trabaja como motor.

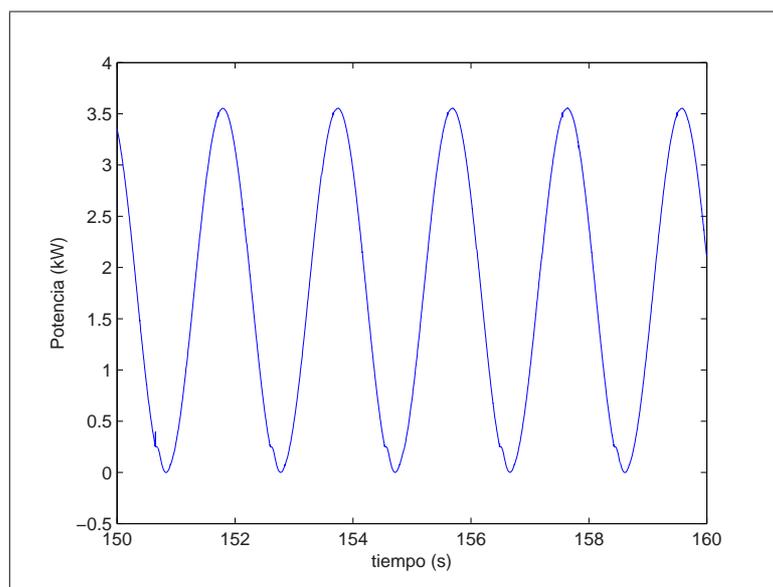


Fig. 8.8: Potencia consumida en el arrollado estático

La potencia instantánea consumida en el arrollado estático se presenta en la figura 8.8.

La potencia promedio asociada a las pérdidas es 1.75 kW. Esta potencia de pérdidas toma un valor alto debido al alto valor de la corriente i_{qs} para la condición de máxima transferencia de potencia.

Se puede observar que de la potencia promedio total transferida al sistema eléctrico (1.8 kW), casi en su totalidad se consume en pérdidas en el generador (1.75 kW) transfiriéndose hacia el SVC una cantidad despreciable (0.050 kW).

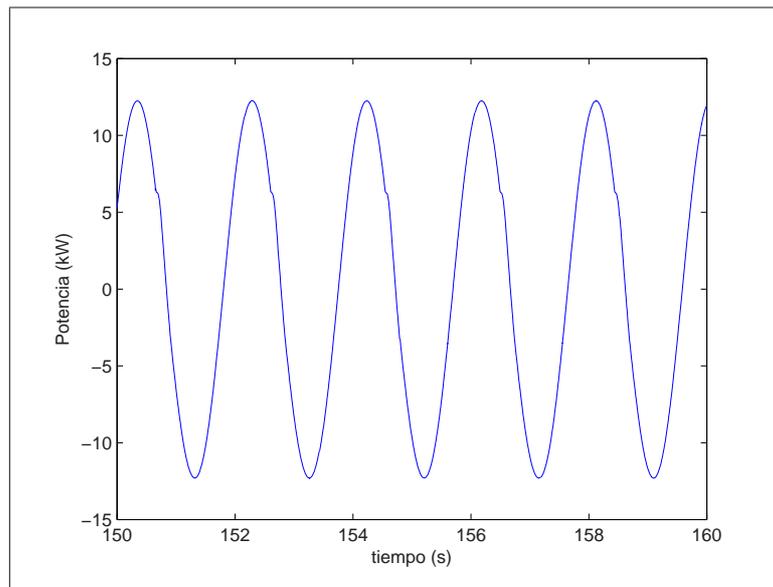


Fig. 8.9: Potencia intercambiada por el condensador

La potencia intercambiada por el condensador se presenta en la figura 8.9 donde se observa que la potencia instantánea máxima que entrega y recibe el condensador es 11.8 kW.

En resumen, para que ocurra la máxima transferencia de potencia (1.8 kW) debe intercambiarse cíclicamente entre el sistema eléctrico e hidrodinámico gran cantidad de potencia (hasta 11.8 kW) disipándose la potencia máxima transferida casi en su totalidad en pérdidas estáticas.

Control subóptimo del convertidor de energía de las olas de Eriksson

Para el segundo escenario se implementa el control subóptimo con constantes que definen la fuerza del PTO de valores $C_{pto}=0$ y $B_{pto}=32703$ kg/s. Con estas condiciones la velocidad del dispositivo es $v(t)=0.167\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s y la potencia instantánea transferida al PTO es $P_{pto}(t)=0.456(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con valor promedio $P_{pto}=456$ W.

En este caso la reactancia del sistema hidrodinámico esta repartida de la siguiente manera: $X_M=14940$ kg/s, $X_C=-47305$ kg/s, $X_{C_{pto}}=0$ kg/s para un total de $X_{sistema}=-32365$ kg/s.

Además, la potencia reactiva de los elementos del sistema durante el control subóptimo es el siguiente: $Q_M=5.8$ kvar, $Q_C=-18.3$ kvar, $Q_{C_{pto}}=0$ kvar, $Q_{sistema}=-12.5$ kvar. En este caso el generador no intercambia cíclicamente potencia con el sistema hidrodinámico y por el ajuste de B_{pto} se transfieren 456 W de potencia promedio. El factor de calidad del generador es $Q_{pto}=0$.

El valor máximo de la corriente i_{qs} para el caso subóptimo es $i_{qs}^{max}=13.96$ A y las pérdidas en la resistencia estática son 66 W aproximadamente. Entonces, la carga de potencia constante debe ser ajustada a 390 W.

En resumen, en el caso subóptimo la transferencia de potencia es de 456 W sin intercambio cíclico de potencia entre el sistema eléctrico e hidrodinámico. La potencia disipada en el estator es 66 W y la de la carga es 390 W.

Mejora del desempeño del convertidor de energía de las olas de Eriksson agregando un cuerpo suplementario sumergido

Se pueden corregir los desbalances de potencia observados en el sistema analizado usando un cuerpo suplementario sumergido que se agrega a la masa del dispositivo como la esfera auxiliar que plantea el trabajo de Engstrom (Engstrom, Eriksson, Isberg, and Leijon 2009). En dicho trabajo se realiza control en la etapa 1 mediante el cambio de la geometría de la bota. En este sentido Engstrom realiza simulaciones con esferas sumergidas y consolidadas al cuerpo del dispositivo oscilante de radio 2.5 m, 3 m y 4 m mejorándose sustancialmente la respuesta del sistema hidrodinámico.

La masa agregada de una esfera sumergida de radio R_e y densidad ρ ha sido planteada en el trabajo de Brennen (Brennen 1982) y es:

$$M_{ae} = \frac{2}{3}\pi\rho R_e^3 \quad (8.13)$$

En el tercer escenario analizado se utilizará una esfera de radio 2.5 m y densidad 1000 kg/m³ con masa agregada 32725 kg para reducir los desbalances de potencia. En este sentido para la máxima transferencia de potencia el nuevo valor $C_{pto}=33102$ kg/s² se ha ajustado según la siguiente ecuación:

$$C_{pto} = \omega_0^2(M + M_a(\omega_0) + M_{ae}) - C_t - C_{hs} \quad (8.14)$$

Con estas condiciones la velocidad del dispositivo es $v(t)=0.88\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s y la potencia instantánea transferida al PTO es $P_{pto}(t)=1.8(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con valor promedio $P_{pto}=1.8$ kW.

En este caso la reactancia del sistema hidrodinámico esta repartida de la siguiente manera: $X_M=67800$ kg/s, $X_C=-47305$ kg/s, $X_{C_{pto}}=-20495$ kg/s. Además, la potencia reactiva de los elementos del sistema durante el control óptimo es el siguiente: $Q_M=26.3$ kvar, $Q_C=-18.3$ kvar, $Q_{C_{pto}}=-8$ kvar. En este caso el generador intercambia -8 kvar por el ajuste de C_{pto} y obtiene 1.8 kW por el ajuste de B_{pto} .

El valor máximo de la corriente i_{qs} es $i_{qs}^{max}=47.24$ A y las pérdidas en la resistencia estática son 750 W aproximadamente. Entonces, la carga de potencia constante se ajusta a 1050 W.

En resumen, en el caso óptimo con una esfera de radio 2.5 m sumergida y adosada al sistema, la transferencia de potencia es de 1800 W con intercambio cíclico de potencia entre el sistema eléctrico e hidrodinámico de -8 kvar. La potencia disipada en el estator es 750 W y la de la carga es 1050 W.

En el cuarto escenario analizado se utilizará una esfera de masa agregada tal que se anule el coeficiente C_{pto} para la máxima transferencia de potencia. Según la ecuación 8.14 el valor de M_{ae} que anula el coeficiente C_{pto} es 20037 kg. Para esta masa agregada esférica el radio asociado es $R_e=2.12$ m.

En estas condiciones y para la máxima transferencia de potencia la velocidad del dispositivo sigue siendo $v(t)=0.88\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s y la potencia instantánea transferida al PTO es $P_{pto}(t)=1.8(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con promedio $P_{pto}=1.8$ kW.

Para este caso la reactancia del sistema hidrodinámico esta repartida de la siguiente manera: $X_M=47305$ kg/s, $X_C=-47305$ kg/s, $X_{C_{pto}}=0$ kg/s. Además, la potencia reactiva de los elementos del sistema durante el control óptimo es el siguiente: $Q_M=18.3$ kvar, $Q_C=-18.3$ kvar, $Q_{C_{pto}}=0$ kvar. En este caso el generador obtiene 1.8 kW por el ajuste de B_{pto} y no intercambia potencia cíclicamente con el sistema hidrodinámico.

El valor máximo de la corriente i_{qs} para este caso es $i_{qs}^{max}=10.6$ A y las pérdidas en la resistencia estática son 40 W aproximadamente. Entonces, la carga de potencia constante se ajusta a 1760 W.

En resumen, en el caso óptimo con una esfera de radio 2.12 m sumergida y adosada al sistema, la transferencia de potencia es de 1800 W, la potencia disipada en el estator es 40 W y la de la carga es 1760 W.

En la tabla 8.3 se presentan los resultados para los escenarios analizados anteriormente.

Tab. 8.3: Resultados de los escenarios analizados para el convertidor de energía de las olas de Lysekil

Escenario	1	2	3	4
Control	óptimo	subóptimo	óptimo	óptimo/subóptimo
Radio de la esfera (m)	0	0	2.5	2.12
Masa agregada de la esfera (kg)	0	0	32725	20037
$M + M_a + M_{ae}$ (kg)	9250	9250	41975	29287
B_r (kg/s)	4700	4700	4700	4700
$C_t + C_{hs}$ (kg/s ²)	76407	76407	76407	76407
B_{pto} (kg/s)	4700	32703	4700	4700
C_{pto} (kg/s ²)	-52274	0	33102	0
X_M (kg/s)	14940	14940	67800	47305
X_C (kg/s)	-47305	-47305	-47305	-47305
$X_{C_{pto}}$ (kg/s)	32365	0	-20495	0
P_r (kW)	1.8	0.456	1.8	1.8
Q_M (kvar)	5.8	5.8	26.3	18.3
Q_C (kvar)	-18.3	-18.3	-18.3	-18.3
P_{pto} (kW)	1.8	0.456	1.8	1.8
Q_{pto} (kvar)	12.5	0	-8	0
$P_{perdidas}$ (kW)	1.75	0.066	0.750	0.04
P_{carga} (kW)	0.05	0.390	1.050	1.76

8.1.2 Estudio del convertidor de energía de las olas de Havelock

El segundo dispositivo estudiado es el WEC oscilante esférico del trabajo de Havelock (Havelock 1955). Los datos del sistema hidrodinámico se presentan en la tabla 8.4.

Tab. 8.4: Datos del subsistema hidrodinámico de Havelock

Masa M	14137 kg
Radio R	1.5 m
Densidad ρ	1000 kg/m ³
Gravedad g	9.81 m/s ²
Altura hundida d	0.75 m
Hidrostática C_{hs}	69343 kg/s ²
Tensor C_t	6200 kg/s ²

Para los escenarios estudiados se ha asumido oleaje regular definiéndose para la frecuencia respectiva tanto la resistencia de radiación como la masa agregada. Adicionalmente se han definido las constantes de máxima transferencia de potencia óptima (C_{pto} y B_{pto}) y subóptima (B_{pto} con $C_{pto}=0$) según sea el caso (ecuaciones 8.8, 8.9 y 8.10).

El sistema eléctrico es el mismo que fue utilizado en los escenarios planteados en el sistema

Lysekil.

Para los escenarios de análisis se asume un oleaje regular de período 3.89 s y altura 0.36 m. El sistema, para la frecuencia del oleaje anterior, tiene un coeficiente de excitación $W=30316$ N/m, una resistencia de radiación $B_r=2051.2$ kg/s y una masa agregada $M_a=2323.8$ kg.

Control óptimo del convertidor de energía de las olas de Havelock

Para el primer escenario de análisis el control óptimo se logra cuando las constantes de la fuerza del generador toman los valores $B_{pto}=2051.2$ kg/s y $C_{pto}=-32598$ kg/s² respectivamente. Con los datos del oleaje y del coeficiente de excitación puede determinarse la fuerza de excitación senoidal que para todos los escenarios estudiados es $F_e(t)=5457\text{sen}(2\pi t/3.89)$ N.

Para que ocurra la máxima transferencia de potencia la impedancia del PTO debe ser el complejo conjugado de la impedancia intrínseca, por tanto, la velocidad del convertidor debe estar en fase con la fuerza de excitación y su valor debe ser $v(t)=1.33\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s. La potencia instantánea transferida al PTO en esta condición es la misma que se disipa en el fenómeno de radiación y es igual a $P_{pto}(t)=1.815(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con valor promedio $P_{pto}=1.815$ kW.

Para garantizar la máxima transferencia de potencia la corriente $i_{qs}(t)$ debe satisfacer la ecuación 7.29. Para el sistema analizado la corriente máxima es 69.8 A aproximadamente y las pérdidas en la resistencia del estator son 1645 W. Es decir, en la condición de máxima transferencia de potencia se puede transferir a la carga 170 W. Para evitar que la tensión en el condensador colapse o crezca indefinidamente la carga de potencia constante debe fijarse en 175 W.

La reactancia del sistema hidrodinámico esta repartida de la siguiente manera: $X_M=26588$ kg/s, $X_C=-46770$ kg/s, $X_{C_{pto}}=20182$ kg/s. La suma de estas reactancias es cero dado que la condición de máxima transferencia de potencia así lo exige.

Es importante notar que existe un desbalance considerable entre la reactancia *inductiva* (asociada a la masa) y *capacitiva* (asociada al fenómeno tenso-elástico) del sistema hidrodinámico que debe ser suministrada en resonancia por el generador. El balance de potencia reactiva en estos elementos durante la resonancia es el siguiente: $Q_M=23.5$ kvar, $Q_C=-41.4$ kvar, $Q_{C_{pto}}=17.9$ kvar. Se debe recalcar que mientras el generador intercambia con el sistema hidrodinámico 17.9 kvar por el ajuste de C_{pto} , obtiene del mismo 1.815 kW por el ajuste de B_{pto} . Este desbalance también se refleja en el factor de calidad del generador $Q_{pto}=9.8$ respecto al factor de calidad del sistema hidrodinámico $Q_{sistema}=6.5$.

En resumen, para que ocurra la máxima transferencia de potencia (1.815 kW) debe intercambiarse cíclicamente entre el sistema eléctrico e hidrodinámico gran cantidad de potencia (17.9 kvar) disipándose en pérdidas estáticas 1645 W y consumiéndose en la carga 170 W.

Control subóptimo del convertidor de energía de las olas de Havelock

Para el segundo escenario se implementó el control subóptimo con constantes que definen la fuerza del PTO de valores $C_{pto}=0$ y $B_{pto}=20286$ kg/s. Con estas condiciones la velocidad del dispositivo es $v(t)=0.1813\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s y la potencia instantánea transferida al PTO es $P_{pto}(t)=0.333(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con valor promedio $P_{pto}=333$ W.

En este caso la reactancia del sistema hidrodinámico esta repartida de la siguiente manera: $X_M=26588$ kg/s, $X_C=-46770$ kg/s, $X_{C_{pto}}=0$ kg/s para un total de $X_{sistema}=-20182$ kg/s. Además, la potencia reactiva de los elementos del sistema durante el control subóptimo es el siguiente: $Q_M=23.5$ kvar, $Q_C=-41.4$ kvar, $Q_{C_{pto}}=0$ kvar, $Q_{sistema}=-17.9$ kvar. En este caso el generador no intercambia cíclicamente potencia con el sistema hidrodinámico y por el ajuste de B_{pto} se transfieren 184 W de potencia promedio. El factor de calidad del generador es $Q_{pto}=0$.

El valor máximo de la corriente i_{qs} para el caso subóptimo es $i_{qs}^{max}=9.4$ A y las pérdidas en la resistencia estática son 29.8 W aproximadamente. Entonces, la carga de potencia constante debe ser ajustada a 303.2 W.

En resumen, en el caso subóptimo la transferencia de potencia es de 333 W sin intercambio cíclico de potencia entre el sistema eléctrico e hidrodinámico. La potencia disipada en el estator es 29.8 W y la de la carga es 303.2 W.

Mejora del desempeño del convertidor de energía de las olas de Havelock

Podría mejorarse el desempeño del dispositivo oscilante de Havelock adaptando el radio de la esfera de manera que el coeficiente C_{pto} calculado mediante la ecuación 8.8 sea cero. Para lograr esto la masa del dispositivo mas la masa agregada debe satisfacer la siguiente relación:

$$M + M_a(\omega_0) = \frac{C_t + \rho g \pi R^2}{\omega_0^2} \quad (8.15)$$

Dado que se conoce la curva normalizada de la masa agregada puede determinarse el radio de la misma para satisfacer la suma $M + M_a(\omega_0)$:

$$M + M_a(\omega_0) = \frac{1}{3} \pi \rho R^3 (4 + M_a^{Norm}(\omega_0)) \quad (8.16)$$

De las ecuaciones 8.15 y 8.16 el se obtiene:

$$\frac{1}{3}\pi\rho(4 + M_a^{Norm})\omega_0^2 R^3 - \rho g\pi R^2 - C_t = 0 \quad (8.17)$$

En nuestro caso el radio óptimo calculado mediante la fórmula 8.17 será $R=2.57526$ m. Para este valor la masa es $M=71540.5$ kg, la masa agregada es $M_a(\omega_0)=9179.02$ kg, la resistencia de radiación es $B_r=9232.07$ kg/s, la constante hidrostática es $C_{hs}=204390.78$ kg/s², el coeficiente de excitación es $W=64316.5$ N/m y la fuerza de excitación es $F_e(t)=11577\text{sen}(2\pi t/3.89)$ N.

Para el tercer escenario de análisis el control óptimo se logra cuando las constantes de la fuerza del generador toman los valores $B_{pto}=9232.07$ kg/s y $C_{pto}=0$ kg/s² respectivamente.

Para que ocurra la máxima transferencia de potencia la impedancia del PTO debe ser el complejo conjugado de la impedancia intrínseca, por tanto, la velocidad del convertidor debe estar en fase con la fuerza de excitación y su valor debe ser $v(t)=0.627\text{sen}(2\pi t/3.89)$ m/s. La potencia instantánea transferida al PTO en esta condición es la misma que se disipa en el fenómeno de radiación y es igual a $P_{pto}(t)=1.815(1-\text{sen}(4\pi t/3.89))$ kW con valor promedio $P_{pto}=1.815$ kW.

Para garantizar la máxima transferencia de potencia la corriente $i_{qs}(t)$ debe satisfacer la ecuación 7.29. Para el sistema analizado la corriente máxima es 14.8 A aproximadamente y las pérdidas en la resistencia del estator son 75 W. Es decir, en la condición de máxima transferencia de potencia se puede transferir a la carga 1740 W. Para evitar que la tensión en el condensador colapse o crezca indefinidamente la carga de potencia constante debe fijarse en 1740 W.

La reactancia del sistema hidrodinámico esta repartida de la siguiente manera: $X_M=130380$ kg/s, $X_C=-130380$ kg/s y $X_{C_{pto}}=0$ kg/s. El balance de potencia reactiva en estos elementos durante la resonancia es el siguiente: $Q_M=51.3$ kvar, $Q_C=-51.3$ kvar, $Q_{C_{pto}}=0$ kvar.

En resumen, cuando ocurre la máxima transferencia de potencia (1.815 kW) se disipa en pérdidas estáticas 75 W y se consume en la carga 1740 W.

En la tabla 8.5 se presentan los resultados para los escenarios analizados anteriormente.

Tab. 8.5: Resultados de los escenarios analizados para el convertidor de energía de las olas de Havelock

Escenario	1	2	3
Control	óptimo	subóptimo	óptimo/subóptimo
Radio de la esfera (m)	1.5	1.5	2.58
Masa de la esfera (kg)	14137	14137	71541
Masa agregada de la esfera (kg)	2324	2324	9179
B_r (kg/s)	2051.2	2051.2	9232
$C_t + C_{hs}$ (kg/s ²)	75543	75543	210591
B_{pto} (kg/s)	2051.2	20286	9232
C_{pto} (kg/s ²)	-32598	0	0
X_M (kg/s)	26588	26588	130380
X_C (kg/s)	-46770	-46770	-130380
$X_{C_{pto}}$ (kg/s)	20182	0	0
P_r (kW)	1.815	0.333	1.815
Q_M (kvar)	23.5	23.5	51.3
Q_C (kvar)	-41.4	-41.4	-51.3
P_{pto} (kW)	1.815	0.333	1.815
Q_{pto} (kvar)	17.9	0	0
$P_{perdidas}$ (kW)	1.645	0.030	0.075
P_{carga} (kW)	0.170	0.303	1.740

8.2 Estudio del Oscilador de Columna de Agua

En este apartado se estudiará el sistema eléctrico asociado al oscilador de columna de agua, evaluando el desempeño de la turbina de impulso radial conectada a un sistema eléctrico aislado sin conexión a red. Para el caso analizado la energía eléctrica es disipada en una carga donde la frecuencia y la magnitud del voltaje pueden ser variables.

Tab. 8.6: Especificaciones del generador síncrono

Especificación	Valor
Potencia Nominal	20 kVA
Tensión	415 V
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	1800 rpm
Resistencia del estator	0.577 Ω
X_d	19.23 Ω
X_q	9.95 Ω
X_l	1.29 Ω
Coefficiente de inercia	1.39 kg m ²
Pares de polos	2

La máquina eléctrica utilizada es un generador síncrono de potencia nominal 20 kVA. Esta potencia esta acorde con la potencia asociada al máximo flujo de aire permitido a través de la turbina. Las especificaciones del generador síncrono se muestran en la tabla 8.6

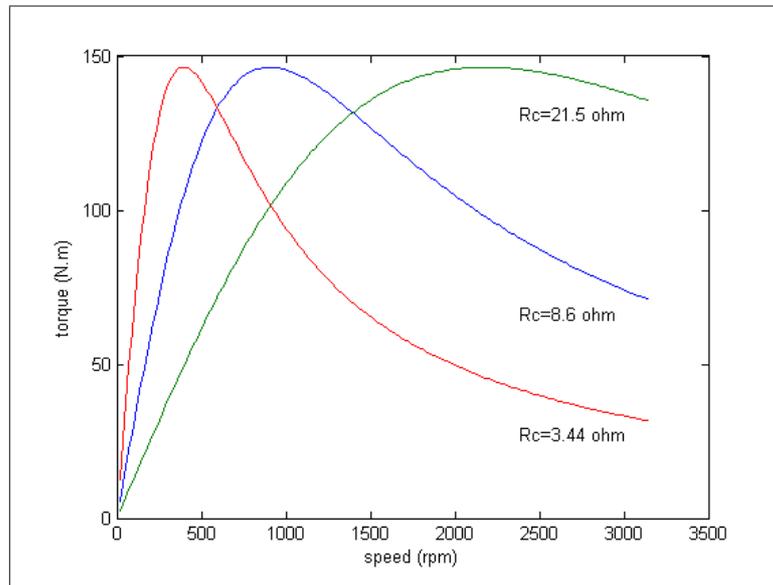


Fig. 8.10: Curva par-velocidad del generador síncrono con excitación $I_{fn}=25 \text{ A}$.

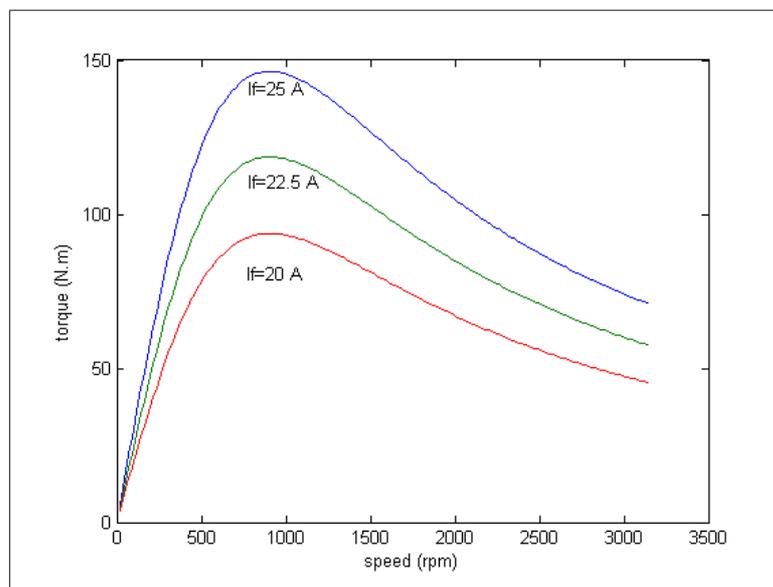


Fig. 8.11: Curva par-velocidad del generador síncrono con carga constante $R_c=8.6 \text{ } \Omega$.

El control sobre el generador se ejerce a través de la carga eléctrica conectada y a través de la corriente de excitación o de campo. La figura 8.10 muestra la curva de par-velocidad del generador síncrono para diferentes cargas resistivas con corriente de campo constante de 25 A. Esta corriente de campo corresponde a la potencia y velocidad nominal. Por otra parte la figura 8.11 presenta la curva par-velocidad para diferentes valores de corriente de campo con carga

eléctrica 8.6Ω constante. Esta resistencia disipa la potencia nominal a la velocidad nominal cuando la corriente de campo es 25 A.

La figura 8.12 muestra el esquema de conexiones de los bloques usados en la simulación. Los modelos han sido desarrollados en el Matlab de Simulink.

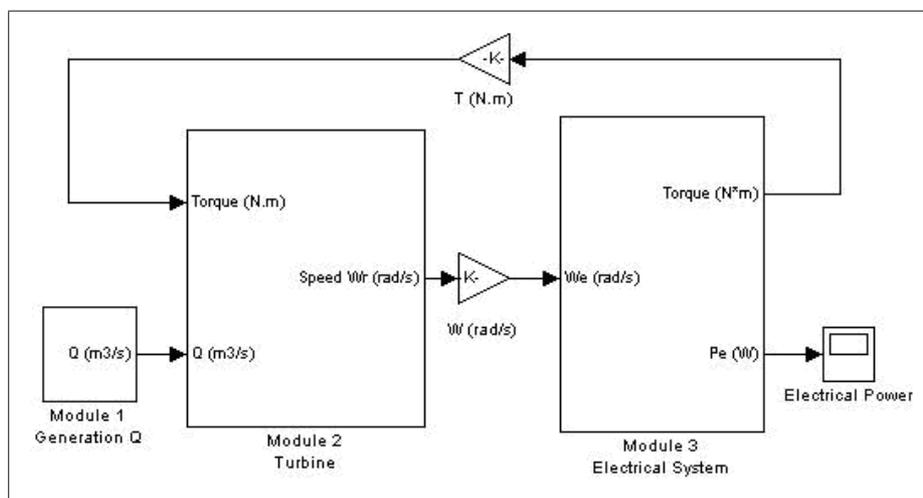


Fig. 8.12: Esquema de conexiones del sistema turbina-generador del AWS

El primer módulo permite establecer el flujo de aire a través de la turbina. El segundo módulo es la turbina cuyo torque es determinado mediante la velocidad y el flujo de aire que la atraviesa. Este módulo incluye la ecuación dinámica del sistema turbina generador

$$T_t - T_g = J \cdot \frac{d}{dt} \Omega \quad (8.18)$$

donde T_t y T_g son los torques desarrollados por la turbina y el generador respectivamente, J es la inercia del rotor y Ω es la velocidad de rotación del eje. El último módulo contiene el modelo del sistema eléctrico y en él se calcula el torque del generador en función de la velocidad y de la carga eléctrica conectada.

Para un flujo de aire específico sobre la turbina es necesario sintonizar tanto la carga eléctrica como la excitación del generador para que trabaje de manera estable. Si el ajuste del sistema eléctrico no permite extraer la energía mecánica del eje turbina-generador, la misma será almacenada en forma de energía cinética haciendo que el sistema trabaje inestablemente con un aumento progresivo de la velocidad del eje.

8.2.1 Pruebas con flujo de aire constante

Las pruebas descritas a continuación permiten evaluar el desempeño de la turbina si el flujo de aire es constante en algún sentido de circulación. El objetivo es obtener, para un flujo de aire

específico, diferentes puntos de operación del sistema turbina-generador. Estos puntos de operación permiten determinar la curva par-velocidad de la turbina. El estado final de equilibrio del sistema turbina-generador está definido por el equilibrio conjunto entre el torque y la velocidad.

En las simulaciones, cada punto de trabajo se ha obtenido modificando la carga eléctrica y la excitación del generador síncrono. Las tablas 8.7 y 8.8 presentan los resultados de varias simulaciones realizadas para flujos de aire constante de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente con una corriente de excitación de 25 A.

Tab. 8.7: Pruebas para flujo de aire constante de $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$

Carga resistiva (Ω)	Velocidad (rpm)	Par (N m)	Potencia en el eje (kW)	Potencia eléctrica (kW)
122	450	163.5	7.704	7.67
84	350	183.6	6.728	6.68
53	250	205.0	5.367	5.31
30	150	223.3	3.492	3.42

Tab. 8.8: Pruebas para flujo de aire constante de $Q = 7.4 \text{ m}^3/\text{s}$

Carga resistiva (Ω)	Velocidad (rpm)	Par (N m)	Potencia en el eje (kW)	Potencia eléctrica (kW)
41	450	424.4	20.00	19.72
28	350	458.1	16.79	16.45
19	250	477.3	12.50	12.12
7	150	568.6	8.93	8.26

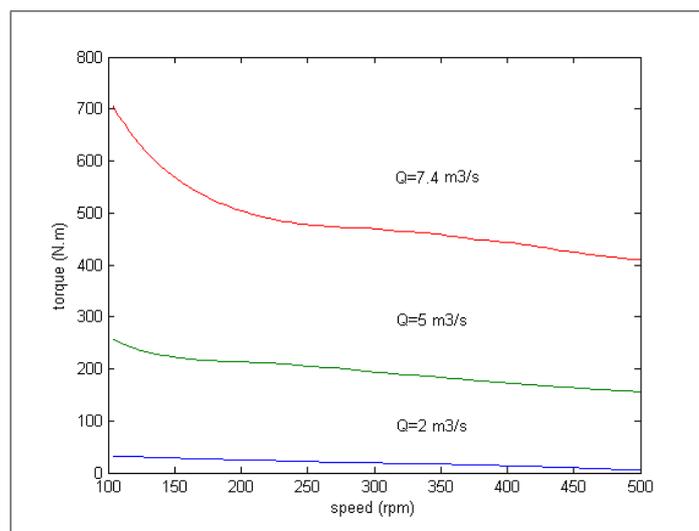


Fig. 8.13: Curvas par-velocidad de la turbina obtenidas para flujos de aire constantes de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las figuras 8.13 y 8.14 presentan las curvas par-velocidad y potencia-velocidad obtenidas para flujos de aire constante de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

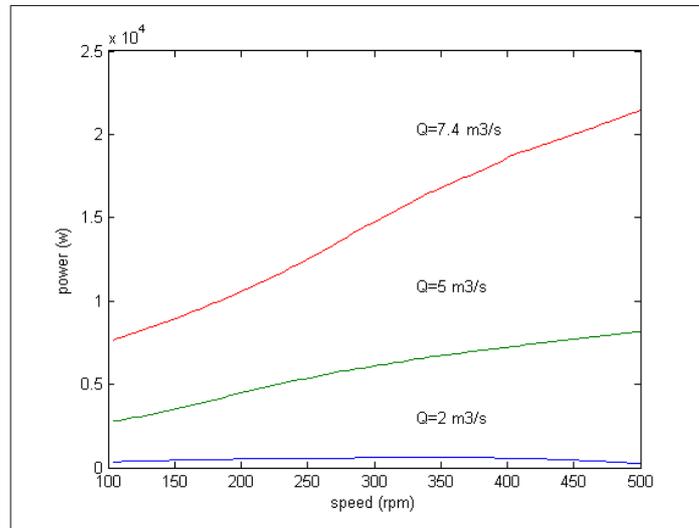


Fig. 8.14: Curvas potencia-velocidad del eje obtenidas para flujos de aire constante de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $7.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

8.2.2 Pruebas con flujo de aire variable

En esta sección se presentan las simulaciones considerando flujo de aire cambiante según la señal senoidal $Q(t)=Q_{max} \text{ sen}(\omega t) \text{ m}^3/\text{s}$.

Durante las simulaciones el sistema eléctrico se mantiene con excitación 25 A y resistencia de carga 95Ω . Las figuras 8.15, 8.16 y 8.17 muestran los resultados de las simulaciones obtenidos para un flujo de aire máximo por la turbina de $Q_{max}=7.4 \text{ m}^3/\text{s}$ con período 5 s .

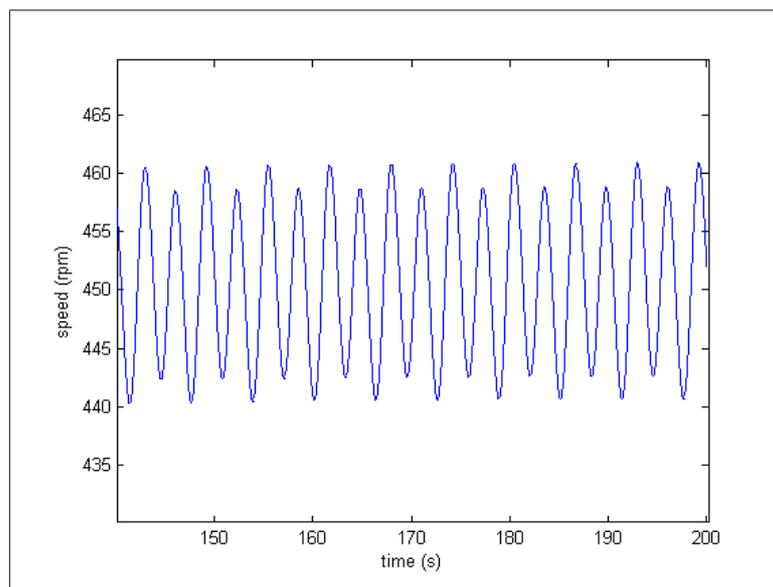


Fig. 8.15: Velocidad para máximo caudal $Q_{max}=7.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

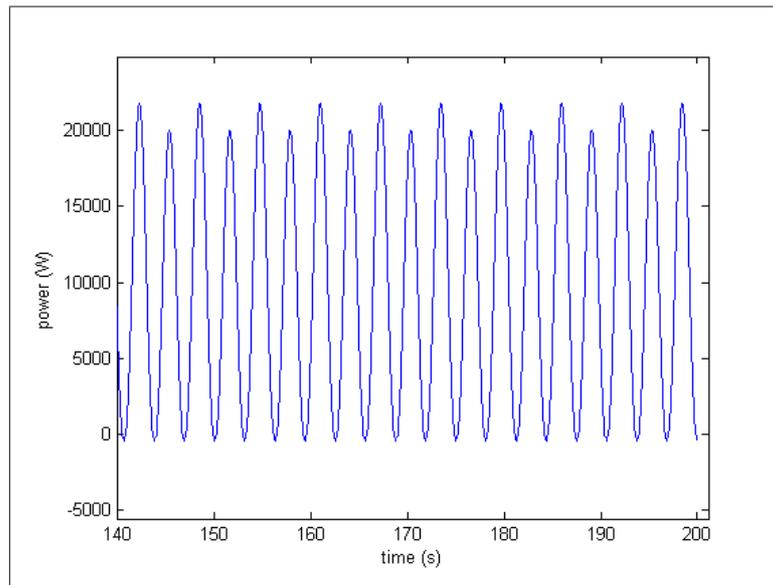


Fig. 8.16: Potencia de la turbina para máximo caudal $Q_{max}=7.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

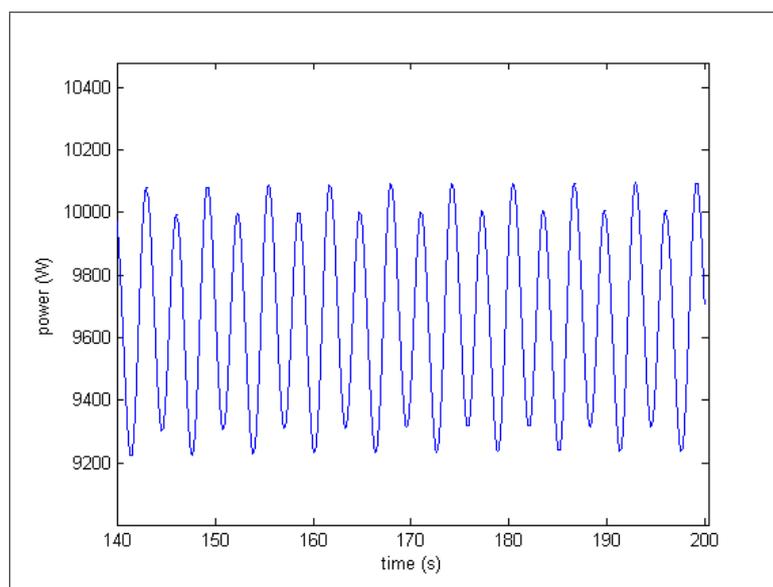


Fig. 8.17: Potencia eléctrica para máximo caudal $Q_{max}=7.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la figura 8.16 se puede notar que la potencia de la turbina toma algunas veces valores instantáneos de 20 kW y en otras ocasiones la potencia es cero. Sin embargo, en la figura 8.17 puede observarse que el generador proporciona una potencia distinta de cero debido a la inercia del sistema. La tabla 8.9 muestra los valores de máxima velocidad, velocidad promedio, máxima potencia y potencia promedio para el flujo máximo de aire $Q_{max}=7.4 \text{ m}^3/\text{s}$ variando la resistencia de carga y la corriente de excitación del campo.

Tab. 8.9: Pruebas para flujo de aire variable con $Q_{max} = 7.4 \text{ m}^3/s$

Carga resistiva (Ω)	Corriente de excitación (A)	Velocidad máxima (rpm)	Velocidad promedio (rpm)	Potencia máxima (kW)	Potencia promedio (kW)
40	25.0	236	226	6.2	5.6
40	22.5	285	275	7.2	6.7
60	25.0	328	317	8.0	7.5
50	18.8	460	450	10.0	9.6