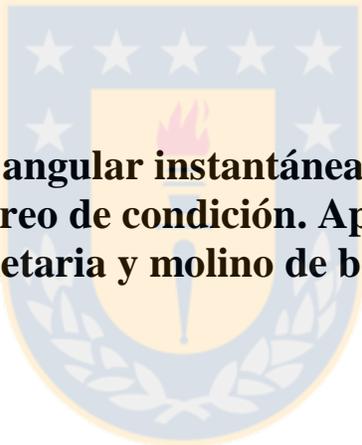




Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería - Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería
Mecánica



Análisis de la velocidad angular instantánea en máquinas rotatorias como técnica de monitoreo de condición. Aplicación en transmisión planetaria y molino de bolas.

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Mecánica

AGUSTÍN ALEXIS CANTO SOLÍS
CONCEPCIÓN-CHILE
2018

Profesor Guía: Dr.-Ing. Cristián Molina Vicuña
Dpto. de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

El monitoreo de la condición mecánica de una máquina rotatoria utilizando la medición de la Velocidad Angular Instantánea (IAS por sus siglas en inglés) ha surgido como una prometedora técnica siendo cada vez más investigada por su alta aplicabilidad bajo condiciones de operación variable.

La velocidad angular resulta ser una respuesta directa del comportamiento dinámico del rotor de una máquina, y su muestreo en el dominio angular permite un seguimiento de las componentes relacionadas con la velocidad de rotación, aún cuando la velocidad de rotación sea variable. Esto es ventajoso en comparación a otras técnicas de monitoreo importantes como lo son las vibraciones transversales, donde para condiciones de operación de velocidad variable es necesario el empleo de técnicas de post-procesamiento para interpretar las mediciones. No obstante, la existencia de fuentes de error en la medición de IAS, obligan a la búsqueda de métodos para su minimización y/o corrección

Este trabajo analiza la IAS como técnica de monitoreo de condición, especialmente para distintas condiciones de operación, aplicando métodos para la minimización y corrección de errores en la medición. Para ello se evalúa la capacidad de diagnóstico tanto en una transmisión planetaria como en un molino de bolas. El desafío planteado es en el caso de la transmisión planetaria, identificar fallas y el componente con daño; y para el caso del molino, estimar el tipo de movimiento que describe la carga al interior del molino mediante su análisis espectral.

La metodología utilizada consiste, para el caso de la transmisión planetaria, en realizar ensayos bajo condiciones de operación variables y con daños en distintos componentes de la transmisión. Luego, mediante un análisis de las mediciones de IAS, se buscan síntomas que permitan diagnosticar los daños impuestos. Para el caso del molino de bolas, en tanto, la metodología consiste en realizar ensayos para distintas condiciones de carga y variando la velocidad. A partir del análisis de las mediciones, se busca encontrar diferencias para los distintos tipos de movimiento del molino, a fin de establecer posibles parámetros para su identificación.

Los resultados obtenidos permiten identificar sin gran dificultad fallas localizadas en el sol a partir de un análisis espectral de la IAS. En tanto, daños en planeta y anillo pueden ser identificados utilizando un post-procesamiento consistente en la aislación de las componentes de interés a través del cálculo de promedios sincrónicos a la frecuencia de falla de interés. Posteriormente, el cálculo del valor pico a pico sobre la señal promediada entrega buenos resultados, permitiendo la identificación correcta del daño para casi todas las condiciones ensayadas. Para el caso del molino de bolas, características como la 1X elevada, el contenido de ruido a alta frecuencia o la aparición de la componente a la frecuencia de paso de lifter, son parámetros que podrían tomarse como referencia para la identificación de características relacionadas con la carga al interior del molino. Se encuentra que la aparición de bandas laterales a la frecuencia de rotación en torno a la frecuencia de paso de lifter es indicador de la ausencia de alguno de los lifter.

Se concluye que la utilización de la medición de la IAS como herramienta de diagnóstico, es altamente importante para el monitoreo de condición en máquinas rotatorias. Permite identificar fallas localizadas en transmisiones planetarias de manera relativamente sencilla y de mejor forma que mediante el análisis

de las vibraciones transversales. Para el caso de molinos de bolas, la medición de la IAS puede ser utilizada como fuente de información para estimar parámetros de la carga al interior del molino, y evaluar la capacidad de arrastre de la carga de los lifter.



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
NOMENCLATURA	x
CAPÍTULO 1	1
Introducción	1
1.1. Objetivos general y específicos	3
CAPÍTULO 2	5
Sistema de medición	5
2.1. Principio de medición de la posición angular de un eje	5
2.1.1. Métodos basados en contador.....	5
2.2. Estimación de la IAS a partir de la medición de la posición angular del eje	6
2.2.1. Utilizando un encoder óptico	6
2.2.1.1. Tiempos transcurridos	8
2.2.1.2. Error de cuantización.....	9
2.2.2. Utilizando un sensor magnético o un proximitor sobre una rueda dentada	10
2.2.2.1. Conversión análogo-digital a partir de la señal del sensor magnético	11
2.3. Fuentes de error en la medición	11
2.3.1. Eliminación de aliasing	12
2.3.2. Compensación de errores geométricos.....	13
2.3.3. Ensayos experimentales	15
2.3.3.1. Corrección de aliasing.....	16
2.3.3.2. Corrección de errores geométricos.....	17
2.3.4. Procedimiento de corrección de errores en la medición.....	19
CAPÍTULO 3	23
Aplicación en transmisión planetaria.....	23
3.1. Descripción de los ensayos.....	24
3.2. Post-procesamiento de datos	25

3.3. Identificación del daño	32
3.3.1. Presentación de indicadores	33
3.3.1.1. Valor RMS de la señal residual	33
3.3.1.2. Valor pico a pico de la señal residual	33
3.3.1.3. Factor de cresta de la señal residual	33
3.3.1.4. Kurtosis de la señal residual	34
3.3.2. Evaluación de indicadores	34
3.3.2.1. Evaluación de indicadores, caso velocidad constante	34
3.3.2.2. Evaluación de indicadores, caso potencia constante	36
3.3.3. Normalización de indicador	41
3.3.4. Ensayos con potencia variable	44
3.3.4.1. Daño en planeta	44
3.3.4.2. Daño en sol	44
3.3.4.3. Daño en anillo	46
3.3.5. Ensayos con velocidad variable	46
3.3.5.1. Daño en planeta	47
3.3.5.2. Daño en sol	47
3.3.5.3. Daño en anillo	48
3.3.6. Discusión de resultados	49
CAPÍTULO 4	51
Aplicación en molino de bolas	51
4.1. Operación y dinámica de molinos	51
4.2. Métodos de medición de IAS	52
4.3. Evaluación de sistemas de medición	53
4.4. Distintas condiciones de operación	57
4.5. Ensayo sin un lifter	59
CAPÍTULO 5	62
Conclusiones y perspectivas	62
5.1. Conclusiones	62
5.2. Perspectivas	63

REFERENCIAS.....	64
ANEXO A.....	67
Presentación de bancos de ensayos.....	67
A.1. Rotor-Kit.....	67
A.2. Transmisión planetaria.....	68
A.3. Molino de bolas.....	70



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1. Acondicionamiento de la señal de un encoder.	5
Figura 2.2. Encoder óptico.	6
Figura 2.3. Encoder incremental, representación de las señales A, B y Z.	7
Figura 2.4. Esquema de un encoder absoluto.	8
Figura 2.5. Medición de los tiempos transcurridos.	9
Figura 2.6. Error de conteo utilizando el método de tiempos transcurridos.	9
Figura 2.7. (a) Sensor magnético, marca Red Lion, modelo LMPC0000. (b) Sensor de proximidad inductivo, marca HWE, modelo LJ12A3-4-Z/BX.	10
Figura 2.8. Formas de onda de salida para distintas formas y tamaños del objetivo.	11
Figura 2.9. Medición de velocidad a partir de una señal análoga.	12
Figura 2.10. Espectro típico de una señal de IAS: (a) señal análoga y (b) IAS calculada.	13
Figura 2.11. Resultados de ensayos en Rotor-Kit: (a) Espectro sobre señal de voltaje y (b) espectro de IAS calculada.	16
Figura 2.12. Espectro de IAS después de filtrar.	17
Figura 2.13. Forma de onda proceso de eliminación de aliasing: (a) forma de onda de voltaje del sensor magnético, (b) forma de onda después de aplicado el filtro propuesto y (c) señal IAS obtenida mediante el método de tiempos transcurridos.	18
Figura 2.14. Razón de paso calculada para la rueda dentada.	18
Figura 2.15. Espectro de IAS medida: (a) sin compensación, (b) compensación mediante promedios sincrónicos y (c) compensación método propuesto.	19
Figura 2.16. Procedimiento de detección de la razón de paso.	20
Figura 2.17. Procedimiento de corrección de errores.	21
Figura 3.1. Distribución de la transmisión planetaria, (a) sistema fijo al anillo y (b) sistema fijo al carrier.	23
Figura 3.2. Condiciones ensayadas.	25
Figura 3.3. Transformada revolución-order de IAS, $fS = 1000$ CPM: (a) sano, (b) daño en planeta, (c) daño en sol y (d) daño en anillo. ((c) y (d) en página siguiente)	26
Figura 3.4. Transformada revolución-order de IAS, $P_{m\acute{a}x}$: (a) sano, (b) daño en planeta, (c) daño en sol y (d) daño en anillo. ((c) y (d) en página siguiente)	28
Figura 3.5. Espectro IAS, 1000 CPM, $P_{m\acute{a}x}/2$: (a) sano, (b) daño en planeta, (c) daño en sol y (d) daño en anillo. ((d) en página siguiente)	30
Figura 3.6. Falla en planeta: (a) promedios sincrónicos y (b) señal residual.	32
Figura 3.7. Indicadores de daño para falla en planeta, $fS = 1000$ CPM: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.	35
Figura 3.8. Indicadores de daño para falla en sol, $fS = 1000$ CPM: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.	36
Figura 3.9. Indicadores de daño para falla en anillo, $fS = 1000$ CPM: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.	37
Figura 3.10. Indicadores de daño para falla en planeta, $P_{m\acute{a}x}$: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.	38

Figura 3.11. Indicadores de daño para falla en sol, $P_{m\acute{a}x}$: (a) RMS se\~{n}al residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.	39
Figura 3.12. Indicadores de da\~{n}o para falla en anillo, $P_{m\acute{a}x}$: (a) RMS se\~{n}al residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.	40
Figura 3.13. Curva base de ensayos con potencia variable, transmisi\~{o}n sana, $fS = 1000$ CPM: (a) sincr\~{o}nico al planeta, (b) sincr\~{o}nico al sol y (c) sincr\~{o}nico al anillo.	42
Figura 3.14. Curva base de ensayos con velocidad variable, transmisi\~{o}n sana, $P_{m\acute{a}x}$: (a) sincr\~{o}nico al planeta, (b) sincr\~{o}nico al sol y (c) sincr\~{o}nico al anillo.	43
Figura 3.15. Valor pico a pico normalizado, caso da\~{n}o en planeta, $fS = 1000$ CPM.	45
Figura 3.16. Valor pico a pico normalizado, caso da\~{n}o en sol, $fS = 1000$ CPM.	45
Figura 3.17. Valor pico a pico normalizado, caso da\~{n}o en anillo, $fS = 1000$ CPM.	46
Figura 3.18. Valor pico a pico normalizado, caso da\~{n}o en planeta, potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$	47
Figura 3.19. Valor pico a pico normalizado, caso da\~{n}o en sol, potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$	48
Figura 3.20. Valor pico a pico normalizado, caso da\~{n}o en anillo, potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$	49
Figura 4.1. Comportamiento de la carga [Wu et al. 2013].	51
Figura 4.2. Raz\~{o}n de paso de la rueda dentada.	53
Figura 4.3. Espectro de la se\~{n}al de IAS medida, 28% nivel de llenado, 8% acero, 20% aluminio; 85% velocidad cr\~{i}tica: (a) sin compensaci\~{o}n de errores geom\~{e}tricos y (b) con compensaci\~{o}n de errores geom\~{e}tricos.	54
Figura 4.4. SAFT durante la partida del molino. 34% nivel de llenado, 14% acero, 20% aluminio: (a) encoder \~{o}ptico y (b) sensor magn\~{e}tico.	55
Figura 4.5. Espectro de IAS obtenido a partir del sensor magn\~{e}tico, 34% nivel de llenado, 14% acero, 20% aluminio: (a) 50% velocidad cr\~{i}tica, (b) 85% velocidad cr\~{i}tica y (c) 125% velocidad cr\~{i}tica.	56
Figura 4.6. Diagrama de una masa desbalanceada en un disco que rota a velocidad constante.	57
Figura 4.7. (a) Amplitud de f_{PL} , (b) amplitud de la 1X y (c) valor RMS a alta frecuencia (>30 Order).	58
Figura 4.8. Espectro de IAS, 70% velocidad cr\~{i}tica. (a) Todos los lifters, (b) un lifter menos.	59
Figura 4.9. Espectro de IAS, 80% velocidad cr\~{i}tica. (a) Todos los lifters, (b) un lifter menos.	60
Figura 4.10. Espectro de IAS, 135% velocidad cr\~{i}tica. (a) Todos los lifters, (b) un lifter menos.	61
Figura A.1. Esquema de la instalaci\~{o}n, Rotor-Kit.	67
Figura A.2. Esquema de la instalaci\~{o}n, transmisi\~{o}n planetaria.	68
Figura A.3. Foto del banco real.	69
Figura A.4. Da\~{n}o local inducido en transmisi\~{o}n planetaria: (a) da\~{n}o en sol, (b) da\~{n}o en planeta y (c) da\~{n}o en anillo.	69
Figura A.5. Esquema de la instalaci\~{o}n, molino de bolas.	71
Figura A.6. Foto del banco real.	71

Todas las Figuras y Tablas son de elaboraci\~{o}n propia, excepto Figura 4.1 (Adaptaci\~{o}n de Wu et al. 2013)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Coeficientes curva de base.....	41
Tabla 3.2. Coeficientes curva de base.....	44
Tabla 4.1. Niveles de llenado ensayados.	57



NOMENCLATURA

i	Índice para señal encoder
j	Índice para señal contador
k	Índice en espectro
l	Índice para número de revolución
t_i	Tiempo real de paso de ángulo [s]
\tilde{t}_i	Tiempo de paso de ángulo medido [s]
θ_i	Posición angular para el segmento de encoder i [rad]
$\Delta\theta_i$	Longitud angular para el segmento de encoder i [rad]
ω_i	IAS real para el segmento de encoder i [rad/s]
$\bar{\omega}_i$	IAS real promediada con los tiempos, t_i , sobre $\Delta\theta_i$ [rad/s]
$\tilde{\omega}_i$	IAS promediada con los tiempos, \tilde{t}_i , sobre $\Delta\theta_i$ [rad/s]
ω_0	IAS media [rad/s]
$\tau_i = \tilde{t}_i - t_i$	Error de conteo para el segmento de encoder i [s]
N	Resolución del encoder
M	Número de revoluciones consideradas
f_c	Frecuencia del contador [Hz]
$t_c = 1/f_c$	Periodo de conteo [s]
$n_{c,i}$	Número de <i>ticks</i> de conteo de alta frecuencia entre dos pulsos sucesivos de encoder.
r_i	Razón de paso normalizado
T_l	Tiempo de duración para la revolución l [s]
d	Diámetro [mm]
m	Módulo [mm]
Z	Número de dientes
Z_S	Número de dientes del sol
Z_P	Número de dientes del planeta
Z_R	Número de dientes del anillo
n_p	Número de planetas
f_g	Frecuencia de engrane
f_S	Frecuencia de rotación del sol
f_C	Frecuencia de rotación del carrier
$f_{S/C}$	Frecuencia de rotación del sol con respecto al carrier
$f_{P/C}$	Frecuencia de rotación del planeta con respecto al carrier
$f_{R/C}$	Frecuencia de rotación del anillo con respecto al carrier
f_{fS}	Frecuencia de falla del sol
f_{fP}	Frecuencia de falla del planeta

f_{fR}	Frecuencia de falla del anillo
P	Potencia [W]
T	Torque [Nm]
f_{PL}	Frecuencia de paso de lifter



CAPÍTULO 1

Introducción

En el monitoreo y diagnóstico de la condición de una máquina rotatoria, la medición y análisis de las vibraciones se ha posicionado como herramienta fundamental. Usando técnicas de procesamiento como la transformada discreta de Fourier, DFT, es posible identificar deterioros específicos en algún componente de la máquina antes de que éste sufra serios daños que involucren otros componentes o conduzcan a una falla catastrófica. Este método, utilizado en máquinas trabajando bajo un régimen estacionario, no es aplicable directamente en máquinas con un régimen no estacionario, como el que se tiene para velocidades variables.

En la práctica, la mayoría de las máquinas posee algún grado de variación de velocidad producto de variaciones en la carga incluso a velocidades nominales constantes, como ser la rotación de un cigüeñal en un motor diesel [Yang *et al.* 2001], la transmisión de engranajes [Stander *et al.* 2005], o incluso la rotación en rodamientos en presencia de falla en alguna de las pistas [Renaudin *et al.* 2010].

De esta forma, la medición de la velocidad angular instantánea (IAS) surge como una importante alternativa y/o complemento al análisis de vibraciones para el monitoreo de la condición mecánica de una máquina. La hipótesis es que pequeñas perturbaciones en máquinas rotatorias, como ser la carga sobre los dientes en transmisiones de engranajes y daños localizados en rodamientos, producen vibraciones torsionales sobre el eje que pueden ser medidas. El método consiste en la rotación de un eje con un dispositivo de codificación angular fijo a él, como un encoder óptico o una rueda dentada. Luego un transductor se usa para detectar los tiempos en que cada segmento del encoder pasa sobre un punto de referencia a medida que el eje gira. Así, el resultado es una señal de tipo de tren de pulso, donde los tiempos de paso entre segmento varían como función de la velocidad de rotación del eje y de las oscilaciones torsionales [Resor *et al.* 2005]. La IAS finalmente, se obtiene de la razón entre el espaciado angular del encoder y los tiempos de paso entre segmentos consecutivos del encoder, a este proceso de extracción de la IAS se le conoce como método del tiempo transcurrido. Puede ser usada para diagnosticar daños o anomalías directamente de la forma de onda [Salas 2014] o en el espectro [Renaudin *et al.* 2010]; o a través de un remuestreo angular basado en order-tracking computarizado (COT) [Saavedra y Rodríguez 2006], o en demodulación de fase [Coats *et al.* 2014].

El método del tiempo transcurrido implica que la medición de la señal de velocidad angular sea realizada de manera indirecta, donde la calidad de la medición depende de la precisión con la que se obtengan los tiempos en los que ocurren posiciones angulares conocidas. Debido a esto, la medición se encuentra afectada por diversas fuentes de error, los cuales en su mayoría son cuantificables. En [Li *et al.* 2005] se realiza una revisión de los métodos de medición de velocidad angular y se establece una expresión para cuantificar el error medido en función del error de conteo del counter, la variación de la equidistancia nominal del encoder y la inestabilidad de la frecuencia del contador. En [André *et al.* 2014] se analiza la

precisión de un monitoreo mediante IAS usando el método de tiempo transcurrido, caracterizando dos fuentes de error: el aliasing y el error de cuantización.

La cuantificación de los errores no es suficiente para obtener una medición que permita diagnosticar fallas. Generalmente se analiza el espectro de la IAS como herramienta de diagnóstico, donde los errores se traducen en aparición de componentes falsas y/o en una variación de su amplitud. Es por esto que se hace necesaria una compensación de estos errores. En la literatura se proponen algunas técnicas para compensar los errores geométricos, las cuales pueden ser clasificadas, según [Diamond *et al.* 2016], como métodos de calibración *offline* u *online*. Los métodos de calibración *offline* requieren de una partida o medición de calibración para determinar la geometría del encoder, la IAS es calculada teniendo como referencia el espaciamiento estimado entre segmentos de encoder. Los métodos de calibración *online*, en tanto, utilizan la propia medición contaminada por las vibraciones torsionales para encontrar el espaciamiento para cada segmento de encoder.

En [Resor *et al.* 2005] se propone un método *offline* para compensar la geometría del encoder mediante promedios sincrónicos en el tiempo, TSA, sobre varias revoluciones del eje de un rotor girando en régimen estacionario. En este método se considera el intervalo de tiempo entre cada pulso de velocidad registrado por el encoder como proporcional al incremento angular durante el intervalo. Para esto se debe asumir una velocidad perfectamente constante o al menos sin fluctuaciones periódicas dentro de cada ciclo. En [Rivola *et al.* 2014] se utiliza cinta reflectante como pulsos para medir la velocidad angular. Con el fin de detectar el real espaciamiento entre pulsos se propone una desconexión del torque motriz luego de que se alcanza una cierta velocidad, y se asume una disminución de la velocidad a una tasa constante sobre varias revoluciones. En [Diamond *et al.* 2016] se propone un método *online* para compensar la geometría del encoder bajo perfiles de velocidad arbitraria, donde la geometría es estimada constantemente utilizando regresión Bayesiana.

En [Canto 2017], se proponen métodos para la compensación de los errores identificados. Para la minimización de los errores de conteo o cuantización, se propone la reconstrucción de una señal de pulsos cuadrados a partir de los tiempos entre pulsos y la posterior aplicación de un filtro que suavice la función permitiendo interpolar nuevos tiempos de paso de ángulo. Simulaciones numéricas muestran que con el método propuesto es posible reducir en hasta un 86% el error de cuantización, en comparación al error obtenido mediante el conteo tradicional. Para la eliminación del aliasing, se propone un método que permite la eliminación de las componentes alias mediante la aplicación de un filtro pasa banda sobre la señal análoga. El método es evaluado con ensayos experimentales, encontrándose que la aplicación del método sobre una señal con y sin aliasing corrige la medición eliminando las componentes alias y mostrando únicamente las componentes reales. Con respecto a los errores geométricos, se propone una corrección de los errores geométricos basada en una medición de calibración *offline* para determinar la geometría real del encoder. Simulaciones numéricas y ensayos experimentales validan la aplicación del método propuesto para compensar errores geométricos en la medición. La presencia de errores geométricos origina componentes sincrónicas de gran amplitud, como resultado de la periodicidad en las variaciones de los espaciamientos angulares, las cuales son atenuadas significativamente mediante la aplicación del método. En comparación a los métodos existentes, el método propuesto tiene la ventaja de que no requiere como condición que se tenga un perfil de velocidad perfectamente constante o lineal, ya que la calibración se hace en el dominio angular.

En este trabajo, se estudia la aplicación del análisis de la IAS en el monitoreo de la condición para dos tipos de máquinas: una transmisión planetaria y un molino de bolas.

El diagnóstico de la condición mediante la medición de vibraciones transversales en transmisiones planetarias es más complejo que en transmisiones de ejes fijos. La traslación del planeta en torno al sol produce modulaciones asociado a la variación en el tiempo de la posición de los puntos de engrane. Esto no se presenta al medir la IAS, puesto que la señal que se mide es la velocidad angular del eje de entrada, y desde este punto, los planetas engranan angularmente de forma simétrica con respecto al sol. En [Morales 2018], se presenta una evaluación experimental del análisis de la aceleración transversal y la IAS como técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias. Se muestra que un daño local en algún componente de la transmisión genera variaciones tanto en la aceleración transversal como en la IAS, las que pueden ser detectadas mediante distintos análisis. Se destaca el uso de la IAS, dado que no requiere un remuestreo angular, y en comparación con la aceleración transversal, presenta una menor cantidad de familias de bandas laterales, facilitando la interpretación del espectro.

Los molinos de bolas son elementos importantes dentro de los procesos de refinamiento en la industria minera. Para una correcta operación de un molino de bolas es crítico conocer la cinemática de los cuerpos en movimiento. La velocidad de operación debe ser lo suficientemente alta para que las partículas alcancen una trayectoria en caída libre, y lo suficientemente baja para que el punto de impacto de las partículas sea sobre la carga y no sobre los lifters. De esta forma, es relevante el estudio de la dinámica de la carga al interior del molino. Existen algunos modelos para caracterizar el movimiento de partículas: en [Powell 1991] se presenta un modelo de la trayectoria de las partículas, en tanto, en [Morrel 1993], se presenta un modelo de la forma de carga, estudiando el efecto de la velocidad de rotación del molino y del nivel de llenado en la forma de la carga y proponiendo ecuaciones empíricas para determinar la posición del talón, del hombro y un radio interior desde el eje de rotación del molino que define la superficie interna de la carga. En [Maleki-Moghaddam *et al.* 2013], se utiliza una combinación de estudios analíticos y físicos para la determinación de la forma de la carga.

La organización de este trabajo es como sigue: en el capítulo 2 se describe el sistema de medición involucrado en la medición de IAS, presentando el principio de medición utilizado, los tipos de sensores que permiten medir velocidad angular, caracterizando las fuentes de error típicas en la medición y mostrando métodos para la compensación de éstos. En el capítulo 3 se presenta la aplicación de la medición de IAS para el diagnóstico de fallas en una transmisión planetaria. En el capítulo 4 se presenta la aplicación de la medición de IAS para el monitoreo de condición en un molino de bolas. Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las principales conclusiones del trabajo y se presentan perspectivas para continuar con la investigación.

1.1. Objetivos general y específicos

El objetivo general del trabajo es: analizar el uso de la IAS como técnica de monitoreo de condición en máquinas rotatorias.

Como objetivos específicos se tiene:

- Estudiar el sistema de medición e identificar limitaciones asociadas.

- Evaluar de forma analítica y experimental los errores presentes en la medición (aliasing y error geométrico) y presentar métodos para su minimización.
- Evaluar experimentalmente la capacidad de diagnóstico de la IAS, en una transmisión planetaria con daños localizados y en un molino de bolas, aplicando métodos de minimización de errores y post-procesamiento de datos.



CAPÍTULO 2

Sistema de medición

2.1. Principio de medición de la posición angular de un eje

2.1.1. Métodos basados en contador

La medición de la señal de velocidad angular instantánea de un eje en rotación es realizada a partir de la codificación de un eje rotatorio, generalmente dividido angularmente en varios segmentos equidistantes. Ya sea que se pretenda medir utilizando un encoder óptico, o midiendo la variación del campo magnético al apuntar un imán sobre una rueda dentada, el procedimiento para el cálculo de la IAS es similar.

El procedimiento consiste en la identificación de los tiempos en que cambia de estado una señal de niveles TTL¹, en el caso de la utilización de un encoder óptico; o los tiempos en que pasa un diente cerca del sensor, en el caso de la utilización de un sensor magnético apuntando una rueda dentada.

La Figura 2.1 muestra esquemáticamente el proceso de acondicionamiento y los componentes involucrados para obtener la señal deseada como tren de pulsos de nivel TTL. Para el caso de la señal del sensor magnético, la aplicación del filtro y del comparador se realiza de forma digital.

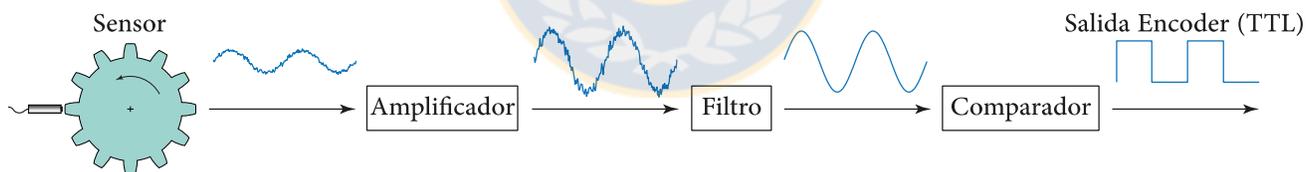


Figura 2.1. Acondicionamiento de la señal de un encoder.

La medición de la IAS se realiza de forma discreta a partir de la siguiente diferencia:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

¹ *Transistor-to-transistor logic*, es un diseño lógico digital donde transistores digitales actúan sobre una señal analógica. Tienen la función de amplificar la señal y transformarla en pulsos lógicos de acuerdo a la amplitud de la señal. Si la amplitud de la señal es superior a un límite, el valor lógico será verdadero, si es inferior al límite, el valor lógico será falso.

donde $\Delta\theta$ corresponde al desplazamiento angular y Δt es la duración en tiempo entre pulsos sucesivos.

Para obtener una buena resolución de la señal se necesita un encoder que ofrezca múltiples pulsos por revolución. El sensor genera un pulso por cada unidad de desplazamiento angular cuando el eje rota, generalmente los pulsos obtenidos son de la forma de una onda cuadrada o sinusoidal. Para un encoder con N divisiones uniformemente distribuidas, cada desplazamiento angular corresponderá a $2\pi/N$ [rad]. En paralelo, un contador de alta frecuencia (f_c) revisa el estado de la señal con el fin de identificar los instantes en que ocurren puntos de cambio del estado de los pulsos TTL, ya sean flancos ascendentes o descendentes.

2.2. Estimación de la IAS a partir de la medición de la posición angular del eje

2.2.1. Utilizando un encoder óptico

Los encoder ópticos presentan la mayor resolución y precisión de todos los encoder [Li *et al.* 2005]. La detección del movimiento angular mediante encoder óptico se basa en la rotación de un disco graduado con un ranurado radial formado por espacios transparentes, alternados con líneas opacas. De forma perpendicular al disco, éste se ilumina proyectando la luz sobre unos receptores los cuales detectan las variaciones de luz que se producen con la rotación del disco, convirtiéndolas en variaciones eléctricas (Figura 2.2).

Los tipos de encoder óptico más comunes son el encoder incremental y encoder absoluto [Troncoso 2008].

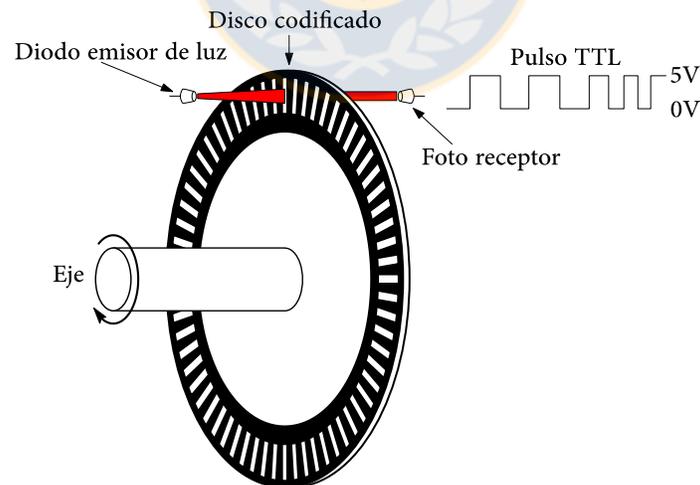


Figura 2.2. Encoder óptico.

El encoder incremental se compone generalmente de tres bandas que consisten en canales de medición, las dos primeras con formas de onda cuadradas y desfasadas entre sí en 90° , comúnmente denominadas “canal A” y “canal B”, y una tercera llamada “canal Z”. Tan sólo con la utilización de la señal “A” es posible obtener la medición de la velocidad de rotación, mientras que si se utiliza a su vez la señal “B” desfasada en 90° es posible determinar el sentido de rotación en base a la secuencia de pulsos. Por otro lado, la señal “Z”, está constituida por un único pulso por revolución y se utiliza como punto de referencia para la identificación de una posición determinada del eje del encoder. La Figura 2.3, muestra una representación de las señales incrementales en el disco y la forma de onda característica para cada una de ellas.

La precisión de un encoder incremental depende de factores mecánicos y eléctricos como ser, el error de división del retículo, la excentricidad del disco y/o de los rodamientos, el error inducido por la electrónica de lectura, imprecisiones de tipo óptico. A su vez, el error de división está dado por el máximo desplazamiento expresado en grados eléctricos de dos pulsos consecutivos.

El encoder absoluto, en tanto, consta de un disco compuesto de varias bandas concéntricas, dispuestas de tal forma que en sentido radial el rotor queda dividido en sectores, con marcas opacas y transparentes codificadas en código Gray o binario. Cada banda representa un bit y por cada bit existe un fotoreceptor que capta la información. El valor binario obtenido es único para cada posición del rotor y representa su posición absoluta. El código Gray presenta la ventaja que para cada cambio de sector sólo cambia el estado de una de las bandas, lo que permite evitar errores por falta de alineación de los captadores. La Figura 2.4, muestra un esquema simplificado de un encoder absoluto.

Para un encoder con n bandas en el disco, el rotor permite 2^n combinaciones, por lo cual la resolución estará dada por:

$$\text{Resolución angular} = \frac{360^\circ}{2^n}. \quad (2.2)$$

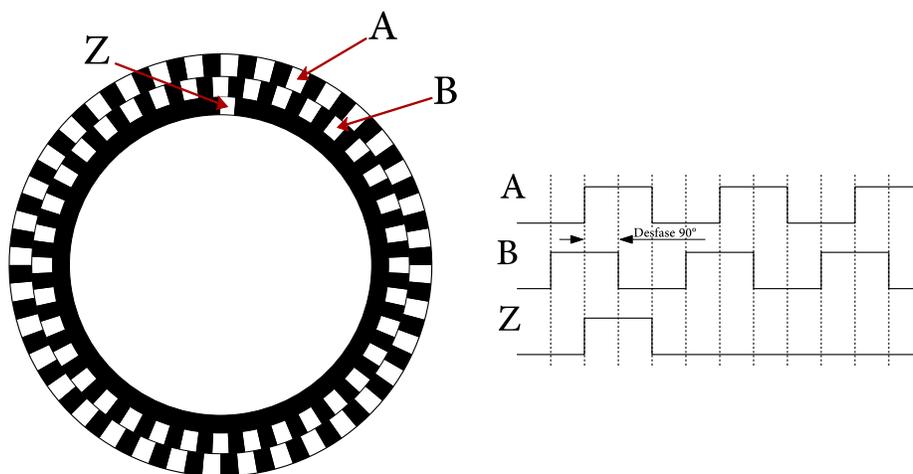


Figura 2.3. Encoder incremental, representación de las señales A, B y Z.

Generalmente los encoder incrementales entregan mayor resolución a un costo más bajo que los encoder absolutos y con una electrónica más simple debido a la menor cantidad de líneas de salida.

Para la medición de la IAS mediante encoder se definen dos pulsos: el pulso del contador y el pulso de velocidad o de encoder [Li *et al.* 2005]. El primero es un pulso de alta frecuencia, f_c , que con un período, $t_c = 1/f_c$, evalúa el estado de la señal del encoder. El segundo representa la señal análoga proporcionada por el encoder compuesta por una serie de flancos ascendentes y descendentes, generalmente equidistantemente espaciados. Su resolución, N , se mide en pulsos por revolución, los encoder más comunes entregan 1024, 2048 o 5000 pulsos por revolución.

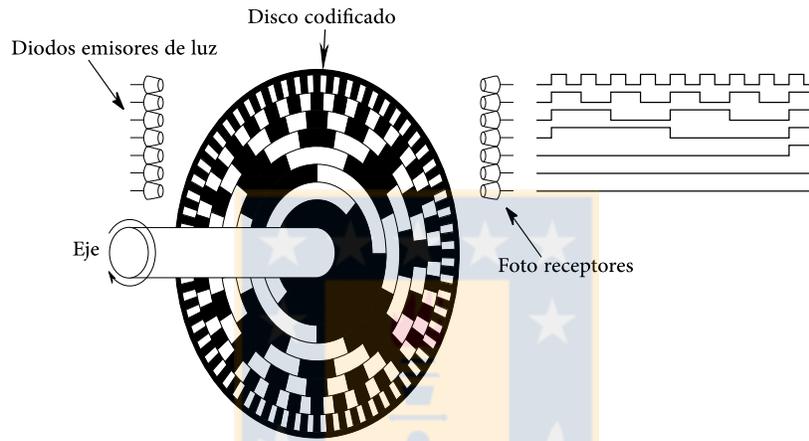


Figura 2.4. Esquema de un encoder absoluto.

2.2.1.1. Tiempos transcurridos

El método mayormente utilizado para la extracción de la velocidad angular a partir de la medición con encoder óptico es el de los “tiempos transcurridos”. Esto por su fácil aplicación, por la alta resolución que ofrecen los sensores y por las altas tasas de conteo con las que la señal puede ser evaluada, las que van desde los megahercios (MHz) hasta los gigahercios (GHz).

La medición de la IAS mediante el método del tiempo transcurrido corresponde a la identificación de la cantidad de *ticks* (n_c) de período t_c que ocurren entre cada pulso del encoder. La Figura 2.5 muestra la forma en que se obtiene la estimación del periodo de tiempo transcurrido entre dos pulsos sucesivos, en base a la cantidad de *ticks* existentes entre ellos.

De esta forma, el valor de la velocidad angular en [rad/s] para cada paso angular $\Delta\theta$ queda dada por,

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_i &= \frac{\Delta\theta}{\Delta t_i} = \frac{2\pi}{\Delta t_i N}, \\ \tilde{\omega}_i &= \frac{\Delta\theta}{\Delta \tilde{t}_i} = \frac{\Delta\theta}{n_{c,i} t_c} = \frac{2\pi f_c}{n_{c,i} N}, \quad i = 1, 2, \dots, NM, \end{aligned} \quad (2.3)$$

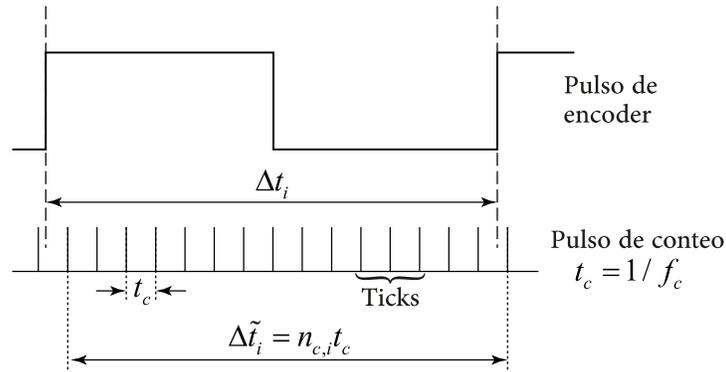


Figura 2.5. Medición de los tiempos transcurridos.

donde el subíndice, i , corresponde al índice de la señal y M es la cantidad de revoluciones medidas. Como se puede ver, la duración de los tiempos nunca será exactamente igual a un número entero múltiplo del periodo de conteo (t_c) por lo que siempre existirá un pequeño error conocido como error de conteo o de cuantización.

2.2.1.2. Error de cuantización

En la Figura 2.6 se esquematiza el proceso de conteo general. Con cada pulso de encoder se comete un error en la detección de los tiempos, τ_i . Donde τ_i es considerado como la diferencia entre los tiempos estimados de ocurrencia \tilde{t}_i y los tiempos reales t_i .

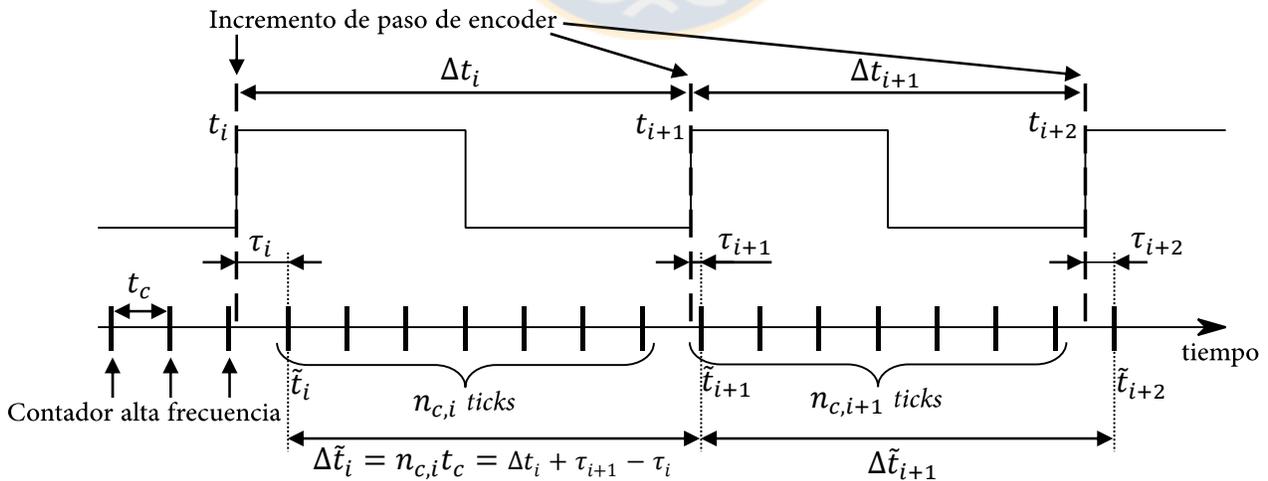


Figura 2.6. Error de conteo utilizando el método de tiempos transcurridos.

El error en la estimación de cada tiempo, τ_i , puede tomar valores entre 0 y $1/f_c$. De esta forma, se minimiza el error al aumentar la frecuencia, f_c , del contador.

2.2.2. Utilizando un sensor magnético o un proximitador sobre una rueda dentada

Los sensores magnéticos consisten de un imán permanente, un polo y una bobina de detección encapsulados en un cartucho cilíndrico, Figura 2.7(a). Un objetivo de acero, metal o algún material magnético, pasando cerca del polo causa una distorsión en el flujo magnético pasando a través de la bobina y el polo, el cual a su vez genera una señal de voltaje. La magnitud de la señal de voltaje depende del tamaño relativo del objetivo magnético, la velocidad de paso del objetivo, y de la cercanía del objetivo con el sensor. La polaridad de la señal depende de si el objetivo se acerca o se aleja del sensor.

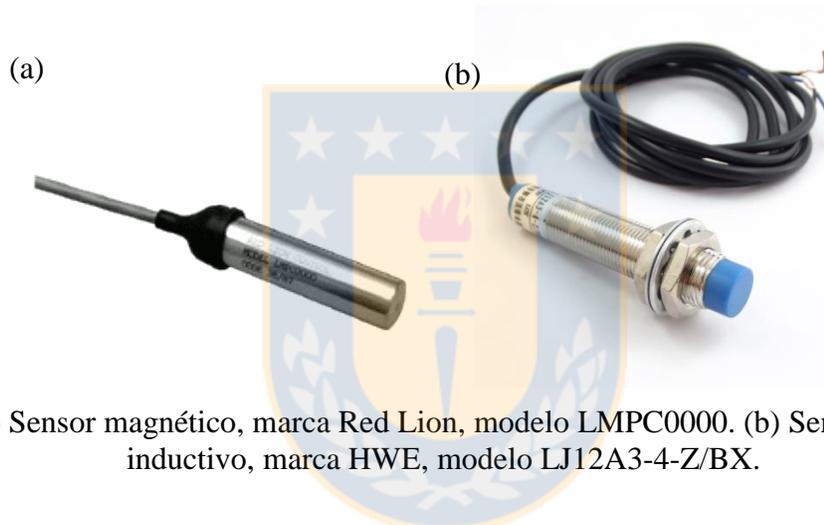


Figura 2.7. (a) Sensor magnético, marca Red Lion, modelo LMPC0000. (b) Sensor de proximidad inductivo, marca HWE, modelo LJ12A3-4-Z/BX.

Los sensores magnéticos son frecuentemente utilizados para medir el paso de los dientes sobre un engranaje, dientes de cadena, ruedas de correa dentadas, cabezas de pernos, o algún otro objetivo montado en máquinas móviles. En la Figura 2.8 se muestran los objetivos típicos y la forma de onda de la señal resultante. Se observa que para engranajes, el sensor entrega una onda continua con un pulso por cada diente del engranaje.

Los sensores de proximidad (Figura 2.7(b)) son muy similares a los sensores magnéticos, la principal diferencia radica en la fuente de alimentación. Mientras los sensores magnéticos no necesitan de una fuente externa para ser alimentados, los sensores de proximidad requieren de una fuente externa de alimentación.

La señal eléctrica entregada por los sensores de proximidad es directamente proporcional a la distancia en que se encuentra el objetivo, entregando su valor máximo cuando el objetivo se encuentra lejos y su valor mínimo cuando el objetivo pasa cerca del sensor.

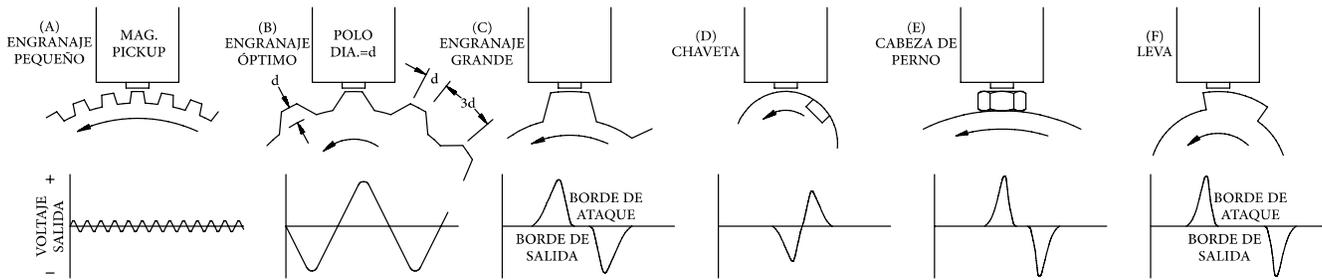


Figura 2.8. Formas de onda de salida para distintas formas y tamaños del objetivo.

2.2.2.1. Conversión análogo-digital a partir de la señal del sensor magnético

La extracción de la IAS a partir de la señal bruta entregada por el sensor magnético se basa en la detección de los cambios de amplitud. La señal es primeramente procesada con un valor medio cero. Luego, para encontrar los flancos ascendentes se identifican los puntos de cambio, donde para dos puntos sucesivos de la señal varía la amplitud de negativo a positivo, usando técnicas de detección de “cruce de cero” (*zero-crossing*), esto es buscar los puntos x_j donde se cumple,

$$x_j x_{j+1} \leq 0 \wedge x_j < 0, \quad (2.4)$$

donde el subíndice, j , corresponde al índice de la señal análoga muestreada con una tasa f_s . Para una mejor aproximación de los tiempos es posible utilizar el punto medio entre los puntos x_j y x_{j+1} , esto incrementa la precisión en la detección de los tiempos sin incrementar los costos computacionales [Saavedra y Rodríguez 2006].

La Figura 2.9 muestra el proceso de adquisición de la velocidad angular a partir de la señal análoga. Como es posible ver, el método de extracción es, en esencia, igual al método de tiempos transcurridos.

2.3. Fuentes de error en la medición

En [Canto 2017] se estudian las principales fuentes de error asociadas a la medición de la velocidad angular derivadas de la particular forma de calcular la IAS y se proponen métodos para la compensación de ellos.

En particular, la utilización de una rueda dentada como encoder presenta dos principales fuentes de error, el aliasing espectral y los errores geométricos. El primero se debe a la limitación en la cantidad de dientes con que puede ser construida la rueda, la que está relacionada con el diámetro según la relación:

$$Z = d/m, \quad (2.5)$$

donde el módulo m , puede tomar valores desde 1 hasta 20; y el segundo, a los errores de fabricación.

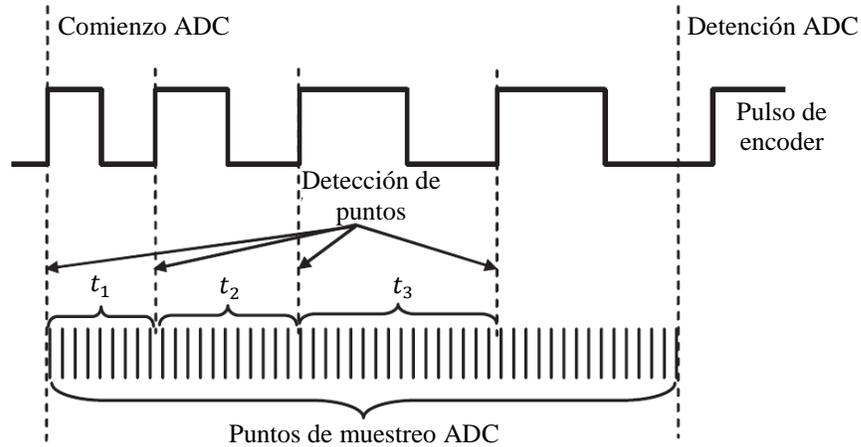


Figura 2.9. Medición de velocidad a partir de una señal analógica.

2.3.1. Eliminación de aliasing

Dada la característica de la medición de la IAS mediante el método de los tiempos transcurridos, no es posible filtrar analógicamente la señal IAS antes del proceso de muestreo. En [Canto 2017] se propone un método para filtrar las componentes con aliasing posterior al muestreo de la señal.

Se considera una señal de IAS estacionaria con valor medio ω_0 y una serie de n variaciones sinusoidales de la forma:

$$\omega = \omega_0 + \sum_{m=1}^n A_m \sin(f_m \theta + \phi_m). \quad (2.6)$$

Para un encoder de resolución N , donde N corresponde al número de pulsos por revolución del encoder, la frecuencia de Nyquist corresponderá a $N/2$ veces la velocidad de rotación. Esto significa que todas las componentes con frecuencia $f_m > N/2$ tendrán aliasing y se reflejarán en el espectro.

Si se considera la señal de la forma de onda que se obtiene de un sensor angular, como la que se obtendría del sensor magnético mencionado en la sección 2.2.2, se observa que el contenido frecuencial en orden de la señal tiene una evidente similitud con el contenido frecuencial de la señal de IAS que se obtiene mediante el cálculo de los tiempos de paso angular. La Figura 2.10 muestra el espectro típico de una señal de IAS con valor medio ω_0 y dos variaciones sinusoidales de orden f_1 y f_2 respectivamente, con f_2 mayor a la frecuencia de Nyquist. La Figura 2.10(a) muestra el espectro que se obtendría al aplicar la transformada discreta de Fourier a la forma de onda del sensor angular, el espectro se compone de una

componente principal de orden N con bandas laterales espaciadas a f_1 y f_2 . La Figura 2.10(b) muestra el espectro que se tendría para la velocidad angular procesada, en el espectro aparece el valor medio, la componente f_1 y como es de esperarse, la componente f_2 reflejada con respecto a la frecuencia de Nyquist.

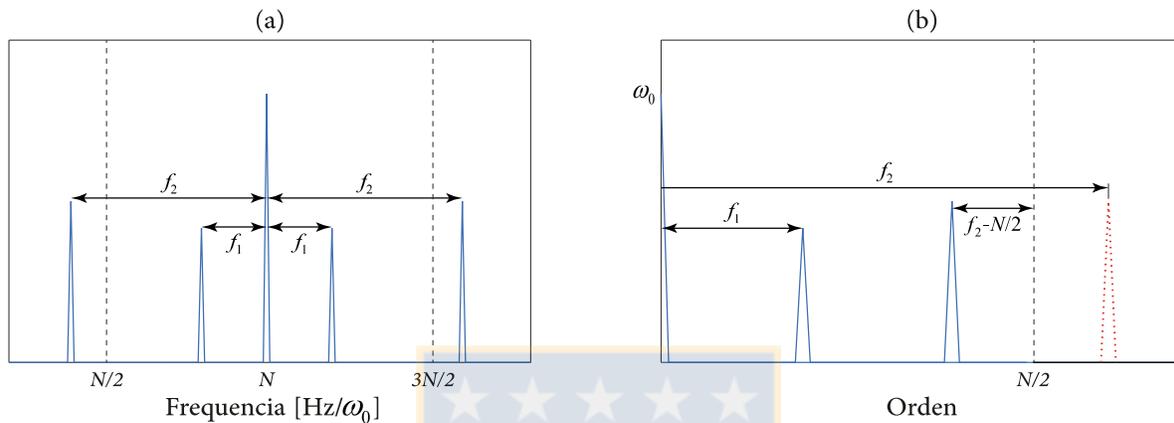


Figura 2.10. Espectro típico de una señal de IAS: (a) señal analógica y (b) IAS calculada.

Dada la correlación en el contenido frecuencial, se propone la aplicación de un filtro pasa banda a la forma de onda, sobre las componentes $N/2$ hasta $3N/2$. De esta forma, el cálculo de la IAS se realizará sin la contribución de las componentes con aliasing. El filtro consiste en calcular la transformada discreta de Fourier, eliminar del vector resultante las componentes que queden fuera de la banda seleccionada y finalmente aplicar la transformada inversa de Fourier, la señal resultante de este proceso de filtrado queda libre de aliasing.

2.3.2. Compensación de errores geométricos

Para el cálculo de la velocidad angular es necesario que los incrementos angulares de cada división del encoder sean de igual longitud, no obstante, esta condición no siempre se cumple debido a errores de fabricación. Encoder ópticos son los que ofrecen la mayor calidad de fabricación, en tanto otros dispositivos de codificación como las ruedas dentadas o cinta reflectante son propensos a generar errores de espaciamento. Para el caso de las ruedas dentadas, se encuentra normalizada la calidad de fabricación que establece el grado de error como la desviación estándar para la distancia entre cada diente. Otro tipo de error geométrico se obtiene de un posicionamiento excéntrico del encoder con respecto al centro de rotación del eje, el cual puede darse por un mal acoplamiento de un encoder óptico o algún error de fabricación o de montaje de una rueda dentada.

Los errores inducidos por variaciones de la geometría del encoder pueden afectar de forma significativa al diagnóstico basado en la evaluación del espectro. Para un encoder con variaciones de geometría, la magnitud de las variaciones se repite una vez por revolución, lo que genera en el espectro componentes

sincrónicas con la velocidad de rotación y múltiplos. Para un encoder montado excéntrico, las variaciones medidas son moduladas a la velocidad de rotación del eje en el dominio temporal, por lo que en el dominio angular, es posible observar espectralmente una componente 1X de gran amplitud y un par de armónicos de menor amplitud.

El error geométrico en encoder ha sido estudiado por varios autores. En [Resor et al. 2005] se estudia la medición de las vibraciones torsionales en rotores para los que miden la velocidad angular utilizando encoder óptico, cinta reflectante y ruedas dentadas. Con el fin de compensar errores geométricos, se propone un método de compensación para obtener un vector de referencia representativo de la longitud de los segmentos de encoder real. El método consiste en la aplicación de los promedios sincrónicos sobre los pasos de tiempo para cada segmento del encoder sobre varias revoluciones del eje.

Los métodos propuestos basan la identificación de la geometría en la medición de la IAS mediante un ensayo donde se pueda considerar un perfil de velocidad conocido, ya sea de velocidad constante o lineal. Estos perfiles de velocidad son extremadamente difíciles de lograr en la práctica. Si bien, las pequeñas variaciones aleatorias de la velocidad pueden ser corregidas al promediar sincrónicamente varias revoluciones; las variaciones sincrónicas a la velocidad de rotación, comunes en cualquier mecanismo rotatorio, no son corregidas por los métodos existentes.

Con el fin de corregir la geometría del encoder utilizado se propone un método de calibración basado en la medición en paralelo de la posición angular del eje con un encoder óptico de alta resolución.

Para garantizar una correcta compensación de la geometría, se deben verificar las siguientes condiciones.

- La adquisición de datos de las señales del encoder óptico y del encoder a compensar deben estar perfectamente sincronizadas.
- El ensayo de calibración debe ser realizado con el motor apagado con el fin de no interferir la señal del encoder con componentes eléctricas.
- En lo posible, desacoplar el mecanismo de componentes inerciales que puedan provocar variaciones sincrónicas en la velocidad de rotación.

Al final de la medición se obtendrá un vector $n_{c,j}$, con el número de *ticks* de período $t_c = 1/f_c$ entre cada par de pulsos sucesivos del encoder, y una señal análoga digitalizada con la información del encoder a compensar.

Los tiempos de referencia para cada pulso del encoder óptico se obtienen de la forma:

$$\begin{aligned} t_{ref}(\theta_0) &= 0, \\ t_{ref}(\theta_j) &= t_c \sum_{k=1}^j n_{c,k}, \quad j = 1, \dots, RM, \\ \theta_{ref,j} &= \frac{2\pi j}{R}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

donde el subíndice j , corresponde al índice del encoder de referencia, R es la resolución del encoder y M es el número de revoluciones consideradas.

Para la extracción de los tiempos $t_i, i = 0, 1, \dots, NM$, de la señal análoga se utiliza la técnica de detección de *zero-crossing* [Yu y Zhang 2010]. La posición angular θ_i , asociada a cada tiempo se obtiene por interpolación con los tiempos de referencia. El paso angular para cada segmento de encoder se obtiene de la forma:

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} \quad (2.8)$$

De esta forma, la razón de paso para cada segmento de encoder se obtiene por promediación de los pasos angulares para cada segmento sobre las M revoluciones:

$$r_i = \frac{1}{2\pi M} \sum_{l=1}^M \Delta\theta_{(l-1)N+i}, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (2.9)$$

La razón de paso del encoder promediado se considera representativa del espaciamiento angular real de cada segmento y es utilizado para corregir la medición de la IAS:

$$\bar{\omega}_i = \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t_i} \approx \frac{2\pi r_i}{\Delta t_i} \quad (2.10)$$

Variaciones en el espaciamiento angular implican un muestreo no uniforme de la velocidad, lo que puede causar errores al utilizar algoritmos que utilizan intervalos de muestreo fijo tales como la transformada discreta de Fourier. Es por esto que es necesario aplicar un remuestreo para obtener un vector IAS con un intervalo angular constante entre muestras. El remuestreo puede ser realizado mediante interpolación a partir del par ordenado (θ_i, t_i) , obtenido de la suma acumulativa de los vectores $\Delta\theta_i$ y Δt_i .

2.3.3. Ensayos experimentales

Con el fin de evaluar de forma experimental los métodos de corrección de aliasing y de errores geométricos propuesto, se realiza un ensayo en el Rotor-Kit del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción, ver Anexo A.1.

El Rotor-Kit posee una rueda dentada (encoder) con 12 dientes a la salida del motor, apuntada por un sensor de desplazamiento que entrega una señal sinusoidal con un pulso por cada paso angular del encoder. La señal es muestreada a una tasa de 51.200 Hz. De igual forma, un encoder óptico de 2048 pulsos, acoplado a la salida del eje, permite medir la IAS en forma simultánea con el sensor de desplazamiento.

Para determinar la geometría de la rueda dentada ubicada a la salida del motor, se realiza una primera etapa de calibración, se hace rotar el eje hasta los 600 CPM y se detiene el motor permitiendo que el eje

rote por inercia. Se miden simultáneamente los tiempos transcurridos con el encoder óptico, y la señal análoga con el sensor de proximidad.

En una segunda etapa de medición de IAS, se mide utilizando el sensor de proximidad y el encoder óptico para un régimen estacionario con velocidad angular media de 600 CPM durante 16 segundos. Con esta medición, se evalúa de forma independiente la corrección de aliasing y la corrección de errores geométricos.

2.3.3.1. Corrección de aliasing

La Figura 2.11(a) muestra el espectro de la señal de voltaje en orden centrado en la resolución del encoder. Se observa una componente principal en 12 orden correspondiente al número de pulsos del encoder, con un gran número de bandas laterales espaciadas a 1 orden, debido en parte a pequeñas variaciones en la velocidad angular y a los errores geométricos propios de la rueda dentada. La Figura 2.11(b) muestra el espectro de la velocidad angular procesada a partir de la señal de voltaje, con compensación de errores geométricos. Como la resolución del encoder es 12, la máxima frecuencia observable en el espectro será de 6 orden por lo que todas las variaciones que se encuentren fuera del rango $N/2 = 6$ a $3N/2 = 18$ orden quedan fuera del espectro y se ven reflejadas. Esto se observa por el nivel de ruido que adquiere el espectro y la aparición de ciertas componentes asincrónicas producto del aliasing.

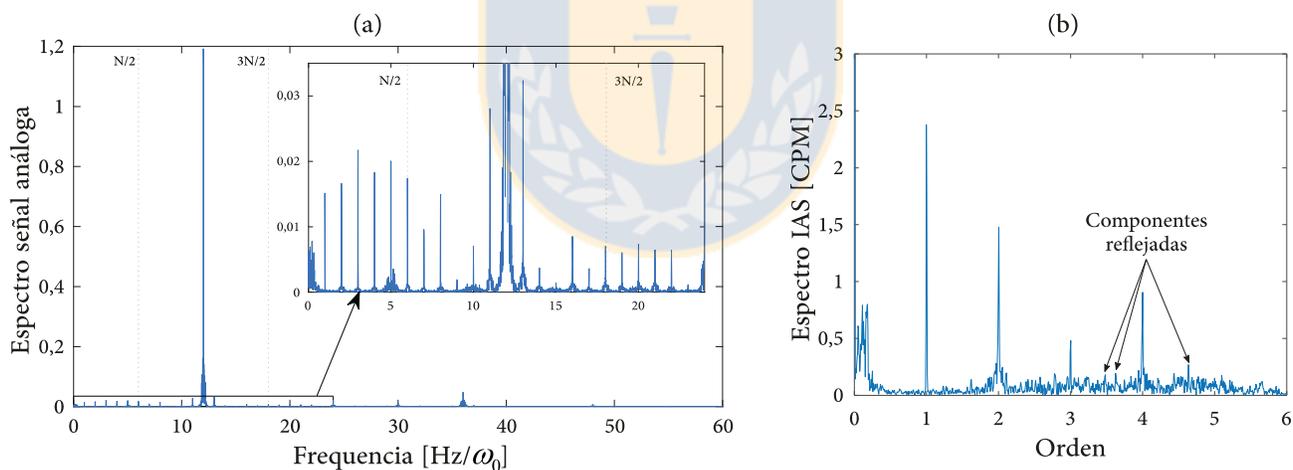


Figura 2.11. Resultados de ensayos en Rotor-Kit: (a) Espectro sobre señal de voltaje y (b) espectro de IAS calculada.

De esta forma, se realiza un filtrado pasa banda de la señal de voltaje centrada en la componente de 12 orden sobre las componentes, desde 6 orden hasta 18 orden, dejando de esta forma fuera el resto del espectro que produce aliasing. La Figura 2.12 muestra el espectro de la velocidad angular obtenida a partir de la forma de onda de la señal filtrada. Se observa cómo el nivel de ruido disminuye

considerablemente y las componentes identificadas como reflejadas desaparecen completamente del espectro, mostrando únicamente las componentes reales.

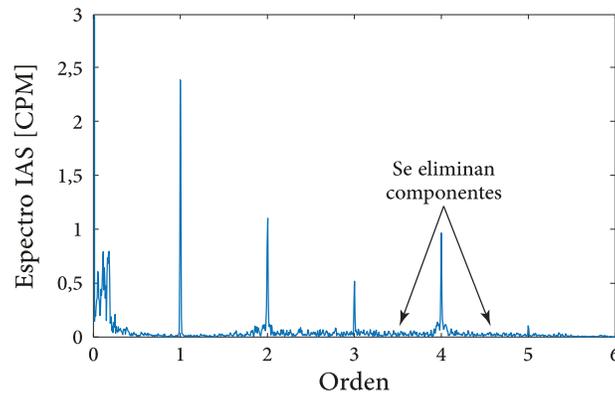


Figura 2.12. Espectro de IAS después de filtrar.

La Figura 2.13 muestra las formas de ondas obtenidas del proceso de eliminación de aliasing. La Figura 2.13(a) muestra la forma de onda de voltaje obtenida del sensor magnético, la cual es proporcional a la distancia entre el sensor y los dientes de la rueda. La Figura 2.13(b) muestra la forma de onda del sensor magnético que se obtiene luego de la aplicación del filtro propuesto. Finalmente, la Figura 2.13(c) muestra la forma de onda de la señal IAS que se obtiene luego de la aplicación del método de los tiempos transcurridos.

2.3.3.2. Corrección de errores geométricos

Para comparar la aplicación del método propuesto en el presente trabajo con la aplicación del método propuesto en [Resor *et al.* 2005] basado en la compensación mediante el promedio de los tiempos sincrónicos, se mide la razón de paso por medio de los dos métodos y se realiza el cálculo de la IAS utilizando los vectores de razón de paso encontrados. La razón de paso mediante el método propuesto se obtiene promediando 20 revoluciones del eje, donde ya no se encuentran variaciones significativas. La Figura 2.14 muestra los valores para la razón de paso para cada segmento de la rueda dentada, se aprecia una gran similitud entre las geometrías encontradas. Adicionalmente se traza la razón de paso teórica $1/N$.

La diferencia existente entre las razones de paso obtenidas mediante los dos métodos, corresponde a las variaciones sincrónicas que se producen en el sistema y que no tienen relación con la geometría de la rueda.

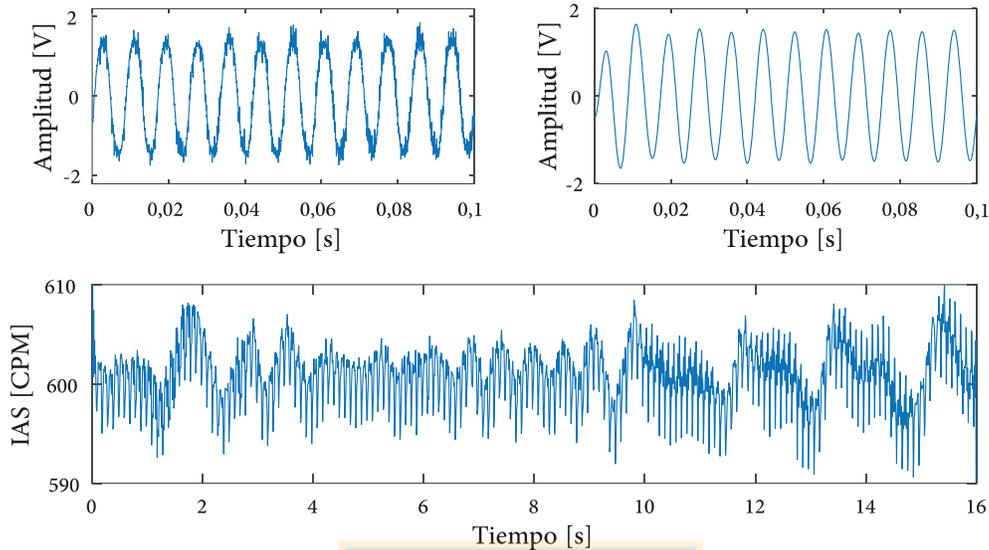


Figura 2.13. Forma de onda proceso de eliminación de aliasing: (a) forma de onda de voltaje del sensor magnético, (b) forma de onda después de aplicado el filtro propuesto y (c) señal IAS obtenida mediante el método de tiempos transcurridos.

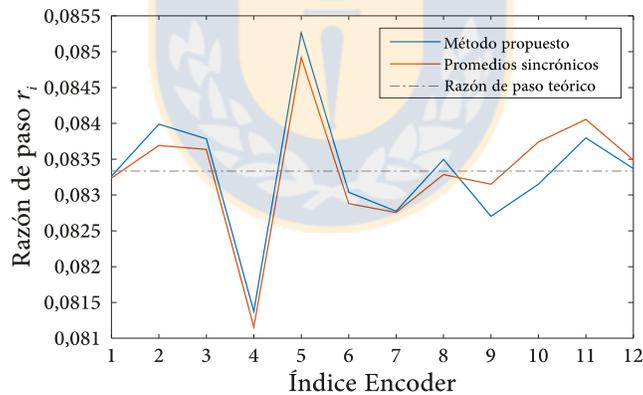


Figura 2.14. Razón de paso calculada para la rueda dentada.

La Figura 2.15 muestra los espectros de la IAS para las señales medidas, realizando corrección de aliasing. La Figura 2.15(a) muestra el espectro de la IAS calculado sin realizar compensación geométrica, como es de esperar se encuentran componentes sincrónicas de gran amplitud producto de los errores geométricos. La Figura 2.15(b) muestra el espectro de la IAS compensada con la razón de paso calculada a través de los promedios sincrónicos en el tiempo, se observa como la compensación eliminó del espectro las componentes sincrónicas, puesto que estas variaciones son tomadas en consideración mediante la aplicación del método de compensación. La Figura 2.15(c) muestra el espectro de la IAS

compensada con la razón de paso obtenida por el método propuesto. Adicionalmente, como referencia se traza con línea de puntos, encima de cada espectro, el espectro de la IAS calculada con la información del encoder óptico. Se observa una gran similitud con el espectro de la IAS compensada con el método propuesto lo que valida la aplicación.

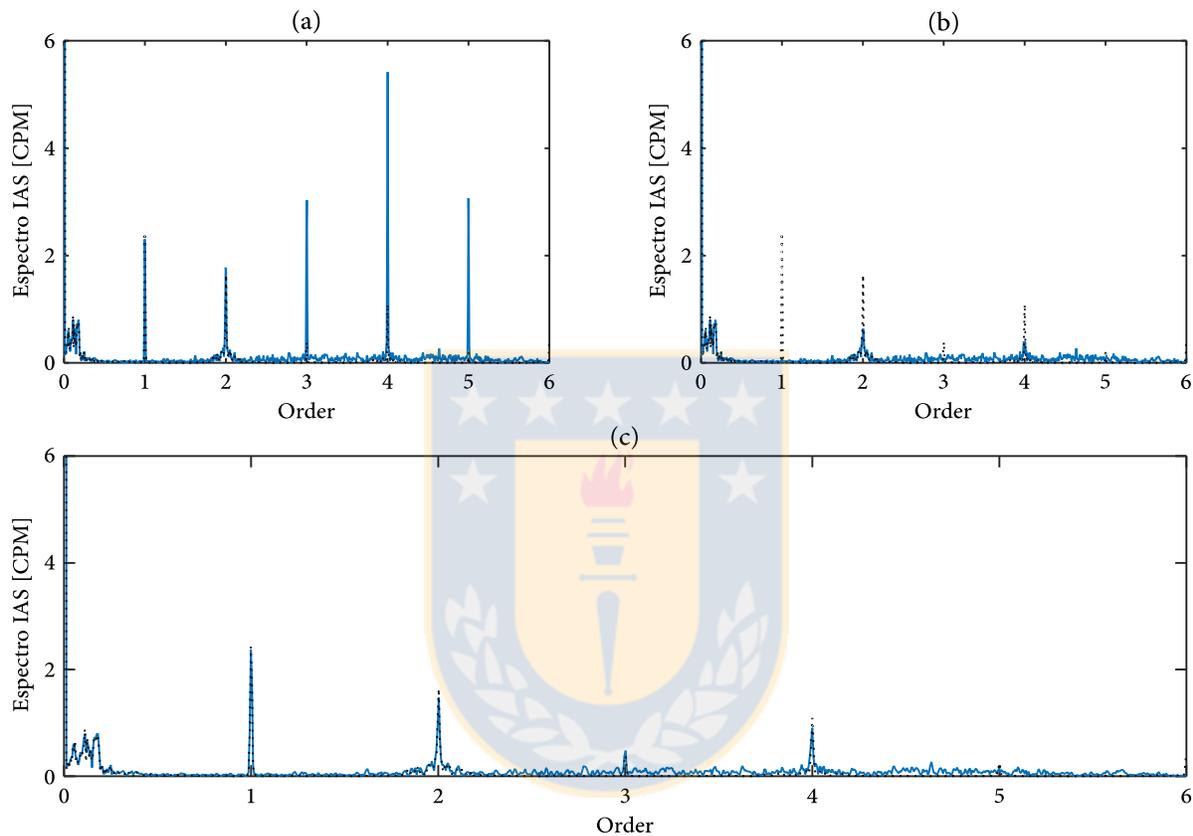


Figura 2.15. Espectro de IAS medida: (a) sin compensación, (b) compensación mediante promedios sincrónicos y (c) compensación método propuesto.

2.3.4. Procedimiento de corrección de errores en la medición

En Figura 2.17 y Figura 2.17, se esquematiza la corrección de errores debido a aliasing y a errores geométricos, aplicado a la medición de IAS a través de un sensor magnético apuntando a una rueda dentada. La Figura 2.17 muestra la primera etapa de calibración que consiste en la obtención de la razón de paso angular r_i entre segmentos de encoder a partir de la interpolación de los tiempos obtenidos mediante *zero-crossing* y los valores de referencia t_{ref} y θ_{ref} , obtenidos desde la medición del encoder óptico. La Figura 2.17 muestra el proceso de eliminación de aliasing y de errores geométricos. El proceso consiste en la aplicación de un filtro pasa banda sobre el espectro de la señal de la forma de onda entregada por el sensor magnético, eliminando la contribución de las componentes con aliasing (sección

2.3.1). Los tiempos de detección de pulsos t_i son extraídos de la señal resultante. Con la construcción de la posición angular corregida θ_i a partir de la razón de paso obtenida en la etapa de calibración, se obtiene un par ordenado (t_i, θ_i) con un muestreo no-homogéneo. Finalmente, se realiza un remuestreo a intervalos $\Delta\theta$ constantes para así obtener por diferenciación $\Delta\theta/\Delta t$ una señal de IAS sin errores geométricos.

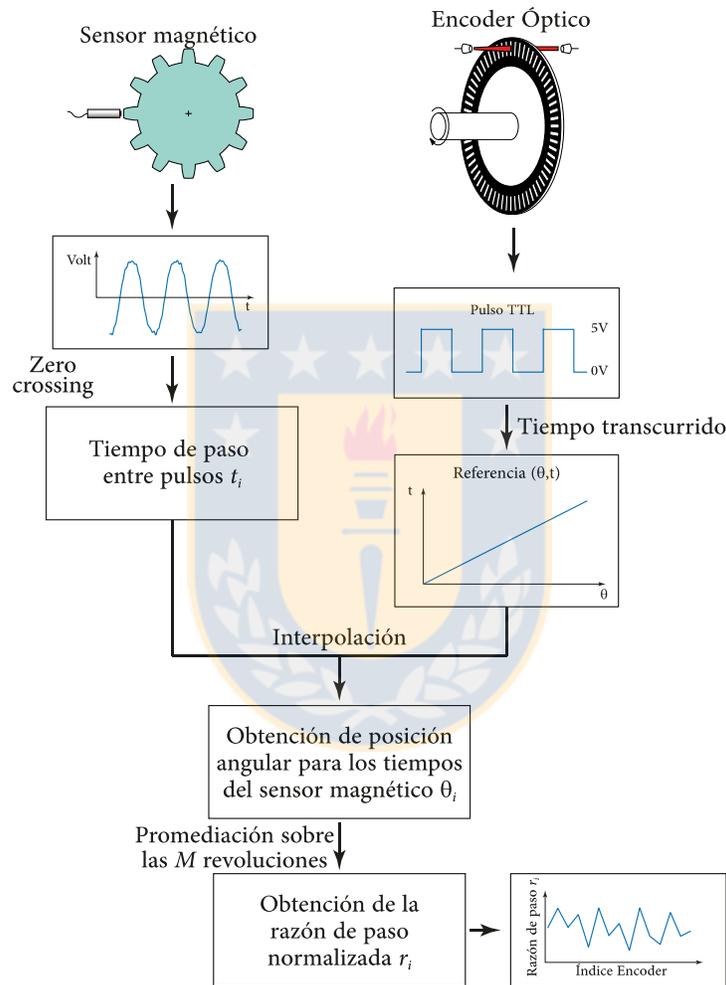


Figura 2.16. Procedimiento de detección de la razón de paso.

La corrección de los errores al momento de medir IAS es fundamental. Con respecto a la presencia de aliasing, el método propuesto permite la eliminación de las componentes alias mediante la aplicación de un filtro digital pasa banda sobre la señal analoga. Eliminando de esta forma la contribución de las componentes con aliasing anterior a la detección de los tiempos. Esto constituye una importante herramienta ya que de la literatura no se conocen filtros anti-aliasing que permitan corregir las

mediciones. Se observó que la aplicación del método sobre una señal con componentes con y sin aliasing corrige la medición eliminando las componentes alias y mostrando únicamente las componentes reales.

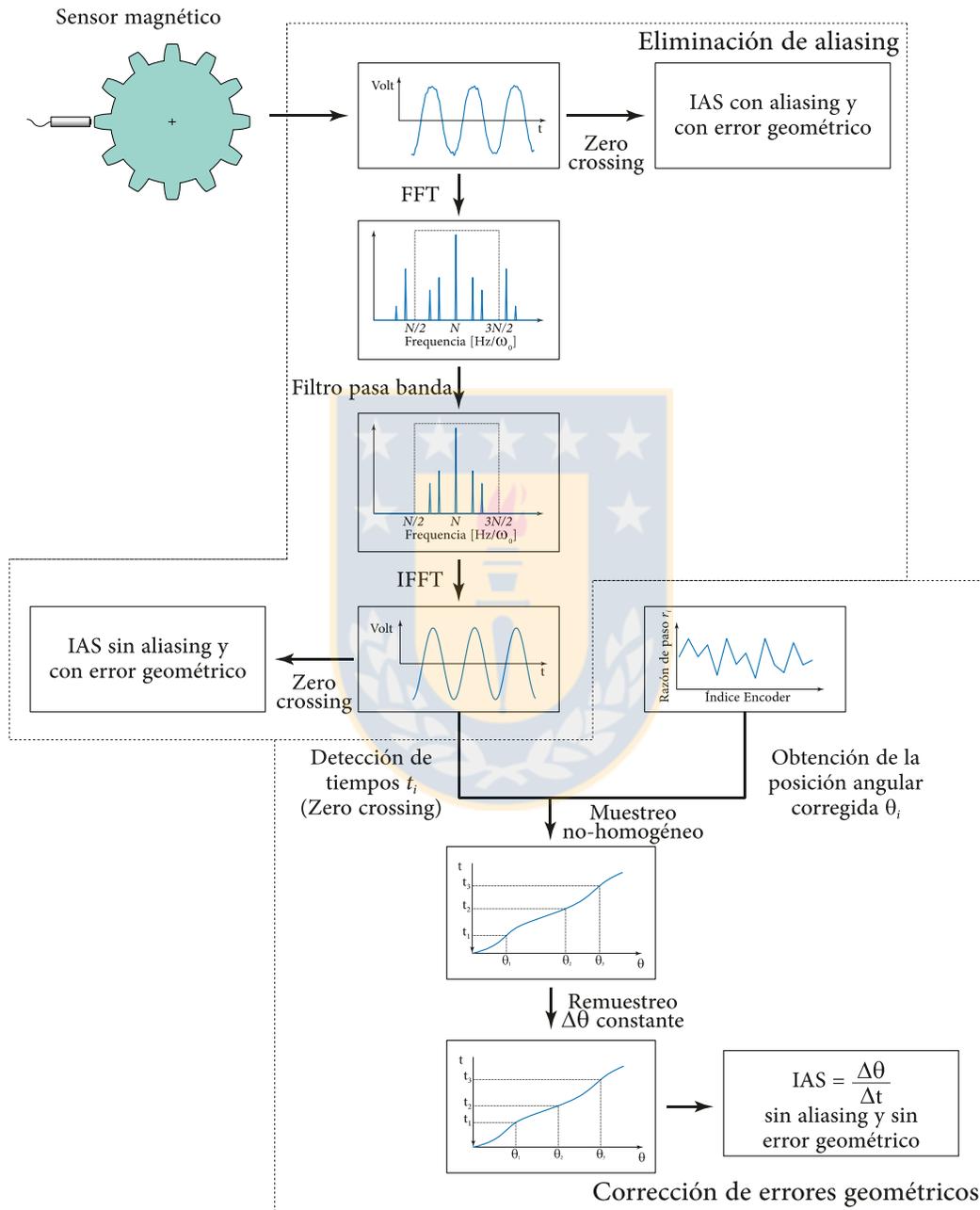


Figura 2.17. Procedimiento de corrección de errores.

Con respecto a los errores geométricos, se observa que la presencia de errores geométricos origina componentes sincrónicas de gran amplitud, como resultado de la periodicidad en las variaciones de los espaciamentos angulares, las cuales son atenuadas significativamente mediante la aplicación del método propuesto. En comparación a los métodos existentes, el método propuesto tiene la ventaja de que no requiere como condición un perfil de velocidad perfectamente constante o lineal ya que la calibración se hace en el dominio angular. Las variaciones en la velocidad angular son bastante pequeñas, por lo que la medición es altamente sensible a la geometría del encoder, en la Figura 2.14 se observa que la diferencia en las geometrías calculadas por distintos métodos son mínimas, sin embargo, es esa pequeña diferencia la responsable de eliminar por completo del espectro las variaciones sincrónicas del sistema (Figura 2.15(b)).



CAPÍTULO 3

Aplicación en transmisión planetaria

El objetivo es poder identificar un componente de la transmisión dañado, bajo condiciones constantes o variables de operación, a través de la medición y análisis de la velocidad angular instantánea.

El banco de ensayos utilizado para realizar las mediciones corresponde a un banco de transmisión planetaria, de una etapa y dientes rectos, instalado en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción, ver Anexo A, sección A.2.

La Figura 3.1 muestra esquemáticamente la distribución de la transmisión planetaria. Para un análisis de la relación de transmisión entre los distintos componentes de la transmisión se considera un sistema fijo al carrier, lo que permite hacer el análisis como si se tratara de un sistema de ejes fijos.

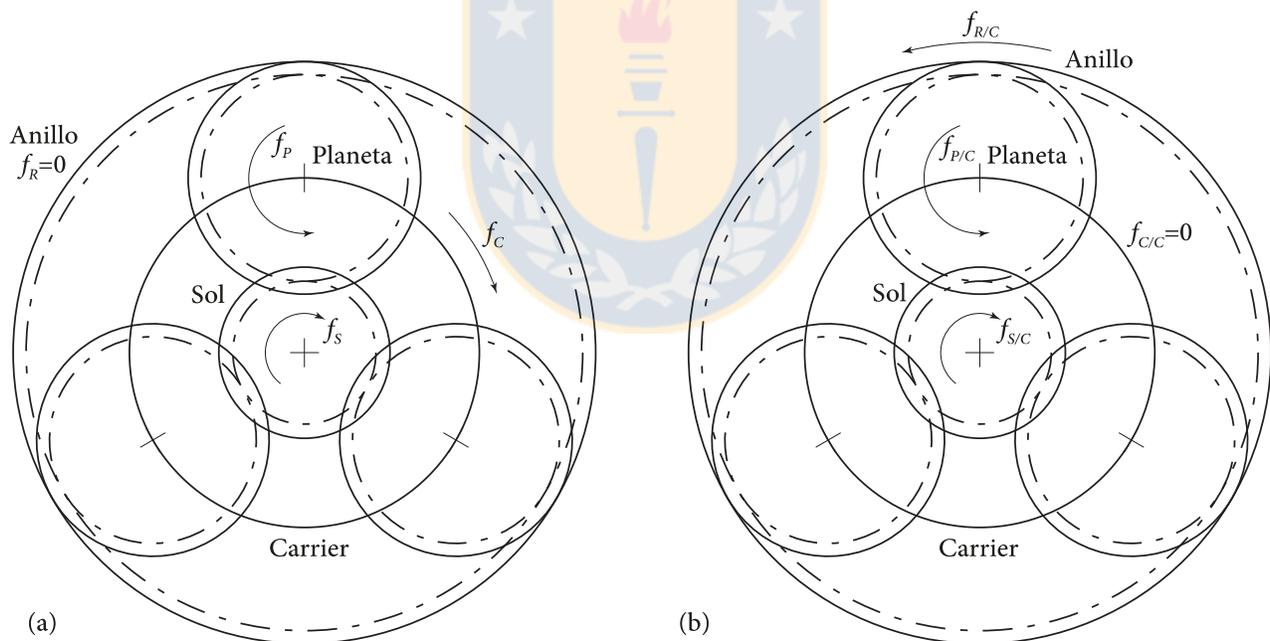


Figura 3.1. Distribución de la transmisión planetaria, (a) sistema fijo al anillo y (b) sistema fijo al carrier.

Así, teniendo en cuenta que los módulos de los engranes son iguales, se tiene:

$$f_g = f_{S/C} Z_S = -f_{P/C} Z_P = -f_{R/C} Z_R, \quad (3.1)$$

$$f_{R/C} Z_R = (f_R - f_C) Z_R = -f_C Z_R, \quad (3.2)$$

donde f_g corresponde a la frecuencia de engrane, y $f_{S/C}$, $f_{P/C}$, $f_{R/C}$, corresponden a las frecuencias de rotación relativas a la rotación del carrier para el sol, planeta y anillo respectivamente.

De las ecuaciones (3.1) y (3.2), y tomando en consideración el número de dientes para cada componente de la transmisión: $Z_S = 18$, $Z_P = 26$ y $Z_R = 72$; es posible obtener la relación de transmisión:

$$\begin{aligned} f_{S/C} Z_S &= (f_S - f_C) Z_C = f_C Z_R, \\ \rightarrow f_S/f_C &= (Z_S + Z_R)/Z_S = 5. \end{aligned} \quad (3.3)$$

De acuerdo a la cinemática de la transmisión, se identifican frecuencias de interés, las cuales son definidas en relación a la frecuencia de rotación del eje de entrada (sol) f_S , que es donde se realiza la medición:

$$\begin{aligned} f_{S/C}/f_S &= (f_{S/C}/f_C)(f_C/f_S) = \frac{Z_R}{Z_S} \frac{1}{5} = 4/5, \\ f_{P/C}/f_S &= (f_{P/C}/f_C)(f_C/f_S) = \frac{Z_R}{Z_P} \frac{1}{5} = 36/65, \\ f_{R/C}/f_S &= (f_{R/C}/f_C)(f_C/f_S) = \frac{Z_R}{Z_R} \frac{1}{5} = 1/5, \\ f_{fS}/f_S &= n_p f_{S/C}/f_S = 12/5, \\ f_{fP}/f_S &= f_{P/C}/f_S = 36/65, \\ f_{fR}/f_S &= n_p f_{R/C}/f_S = 3/5, \\ f_g/f_S &= (Z_S f_{S/C})/f_S = 72/5, \end{aligned} \quad (3.4)$$

donde f_{fS} , f_{fP} y f_{fR} corresponden a la frecuencia de falla del sol, planeta y anillo respectivamente. Para el caso de las fallas en sol y anillo, las frecuencias de falla se obtienen de multiplicar la frecuencia de rotación del componente relativo al carrier por el número de planetas $n_p = 3$ con que engrana.

3.1. Descripción de los ensayos

Como sistema de medición empleado para el cálculo de la IAS se utiliza el encoder óptico instalado sobre el eje de entrada de la transmisión. El encoder entrega 5000 pulsos por revolución, los tiempos de paso de cada segmento son determinados con un contador con una frecuencia de 80 MHz.

Con el fin de medir el comportamiento en la transmisión planetaria bajo distintas condiciones de operación (tanto de carga variable como de velocidad variable) en presencia de una falla localizada, se

desarrollan dos grupos de ensayos: El primer grupo se trabaja a velocidad constante y se varía la carga haciendo variar la potencia al freno de forma lineal desde 0 a $P_{m\acute{a}x}$ en 320 segundos, donde $P_{m\acute{a}x}$ corresponde a la potencia máxima permitida por el fabricante del freno. El segundo grupo se trabaja a potencia constante y se varía la velocidad del motor f_s configurando una partida en forma de rampa lineal en el variador de frecuencia desde 60 CPM a 1800 CPM en 320 segundos.

Los ensayos del primer grupo se trabajan para velocidades del motor f_s de 500 CPM, 1000 CPM y 1500 CPM. En tanto, los ensayos del segundo grupo se trabajan con potencias al freno $P_{m\acute{a}x}$ y $P_{m\acute{a}x}/2$.

Cada uno de estos ensayos se repite para la condición de estado sano, daño localizado en uno de los planetas, daño localizado en sol y daño localizado en anillo, ver Figura A.4. La Figura 3.2 explica esquemáticamente los grupos de ensayo considerados.

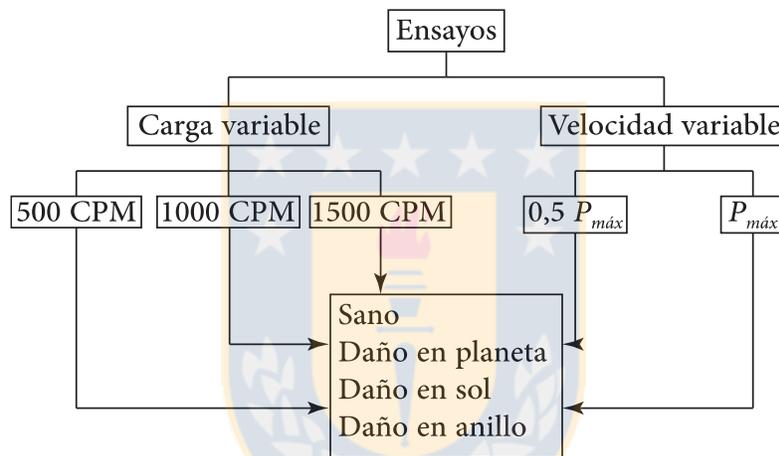


Figura 3.2. Condiciones ensayadas.

3.2. Post-procesamiento de datos

Se realiza una transformada revolución-order (Revolution-Order Transform, *ROT*) ([Saavedra y González 2005]) sobre cada medición a fin de comparar preliminarmente cada ensayo. La transformada utilizada corresponde a la transformada corta de Fourier, que al ser aplicada en el dominio angular, se denomina Short Angle Fourier Transform (SAFT).

La Figura 3.3 muestra la representación en revolución-order de la IAS para los ensayos realizados a velocidad constante con $f_s = 1000$ CPM, en el eje de las ordenadas se ha considerado la potencia en vez de las revoluciones. Se observa que para cada ensayo no existe una variación significativa en el contenido espectral para las distintas condiciones de carga. A simple vista, los resultados obtenidos para los ensayos en estado sano, daño en planeta y daño en anillo (Figura 3.3(a), 3.2(b) y 3.2(d) respectivamente) son indistinguibles, identificando principalmente a baja frecuencia armónicos de la velocidad de rotación del motor f_s de gran amplitud, y armónicos de la frecuencia de engrane f_g bien marcados. Para el caso daño en sol (Figura 3.3(c)), adicionalmente se observan bandas laterales a la frecuencia de falla del sol f_{fS} en

torno a f_g y sus armónicos, lo que indica que un daño en el sol es fácilmente distinguible a partir de un análisis del espectro. En tanto, para la distinción de los otros daños se requiere de un procesamiento adicional.

La Figura 3.4 muestra la representación en revolución-order para los ensayos realizados a potencia constante con $P = P_{máx}$. En este caso, se observa que para cada ensayo, el contenido espectral es altamente dependiente de la velocidad de operación. Se identifican componentes con frecuencia

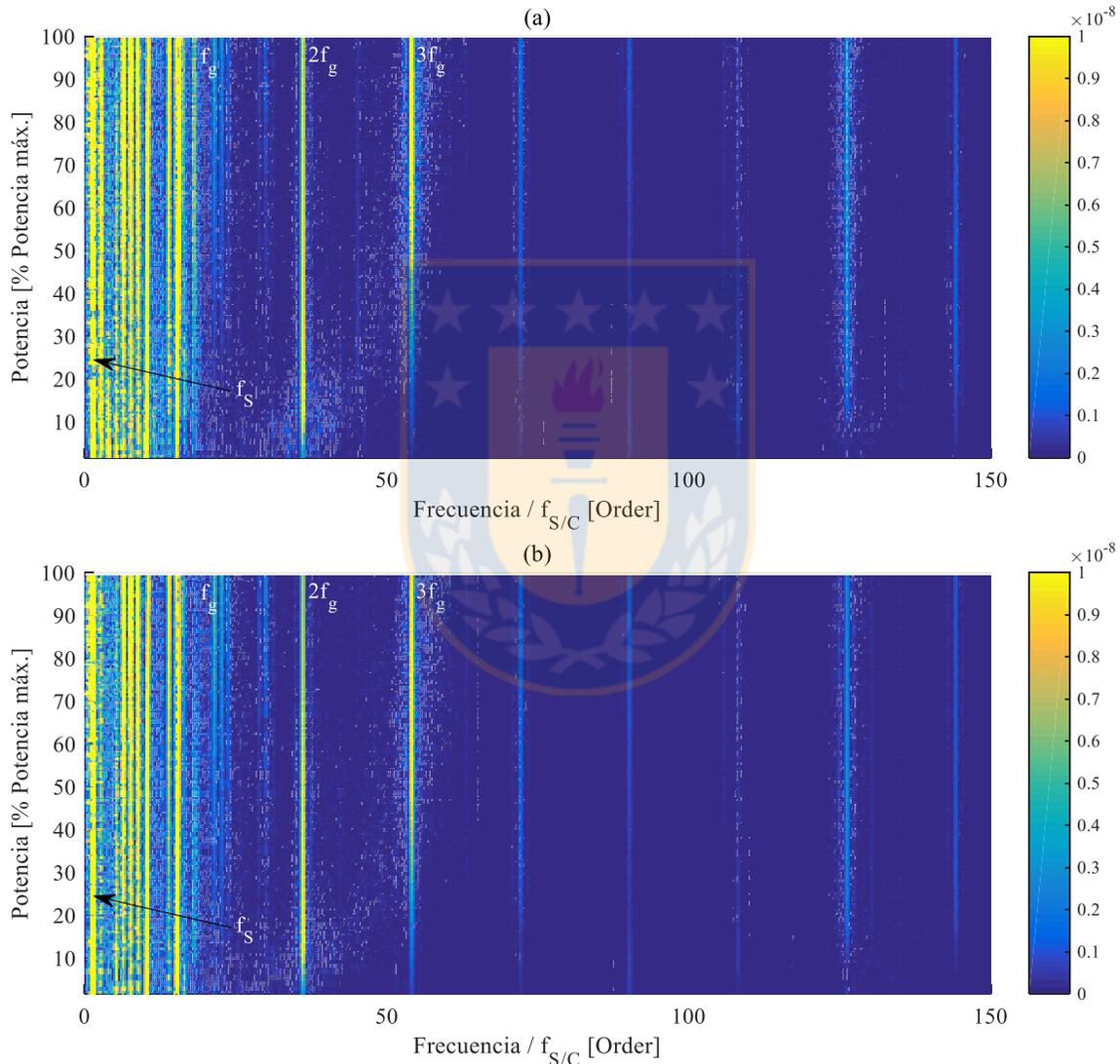


Figura 3.3. Transformada revolución-order de IAS, $f_S = 1000$ CPM: (a) sano, (b) daño en planeta, (c) daño en sol y (d) daño en anillo. ((c) y (d) en página siguiente)

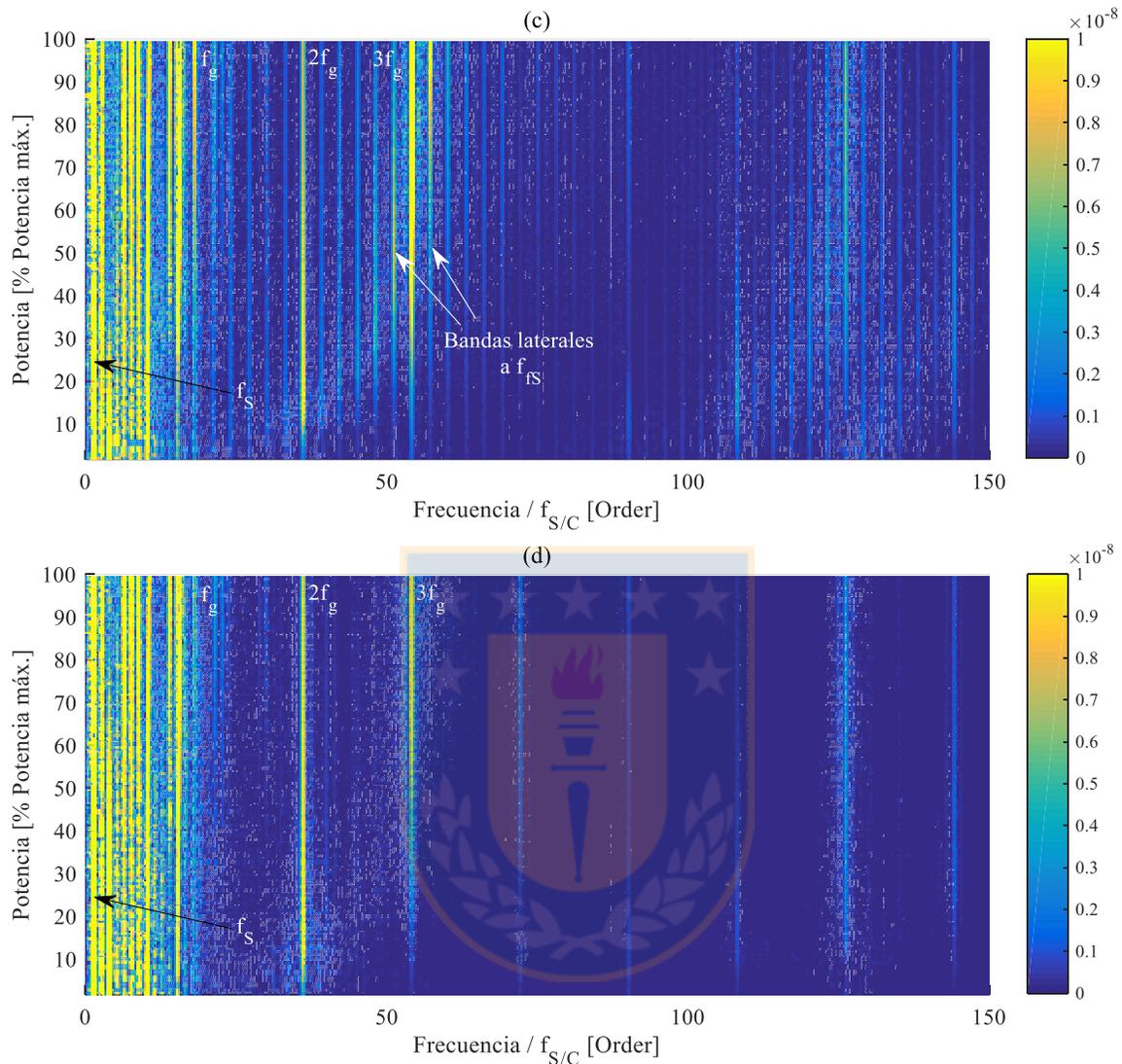


Figura 3.3.

constante en el dominio temporal, que no constituyen una frecuencia relacionada con la frecuencia de rotación. A baja frecuencia se observan armónicos a $2f_L$ (con $f_L = 50\text{Hz}$ la frecuencia de línea) de gran amplitud provenientes de la alimentación del motor eléctrico, para velocidades de rotación del motor bajas, éstas componentes corresponden a altos valores en orden, superponiéndose con los armónicos de la frecuencia de engrane y dificultando su identificación. Para mantener la potencia constante, se debe controlar el voltaje de entrada al freno lo que se traduce en una variación del torque proporcionado por éste, el cálculo de la potencia aplicada es de la forma:

$$P = T\omega = cte. \quad (3.5)$$

Donde T es el torque aplicado y ω corresponde a la frecuencia de rotación de salida f_c . De esta forma, se observa que para frecuencias de rotación bajas, el torque a aplicar debe ser elevado, lo que implica que el torque motriz debe ser elevado en igual medida. Esto explica que para velocidades de rotación del motor bajas la contribución de estas componentes eléctricas sea considerable.

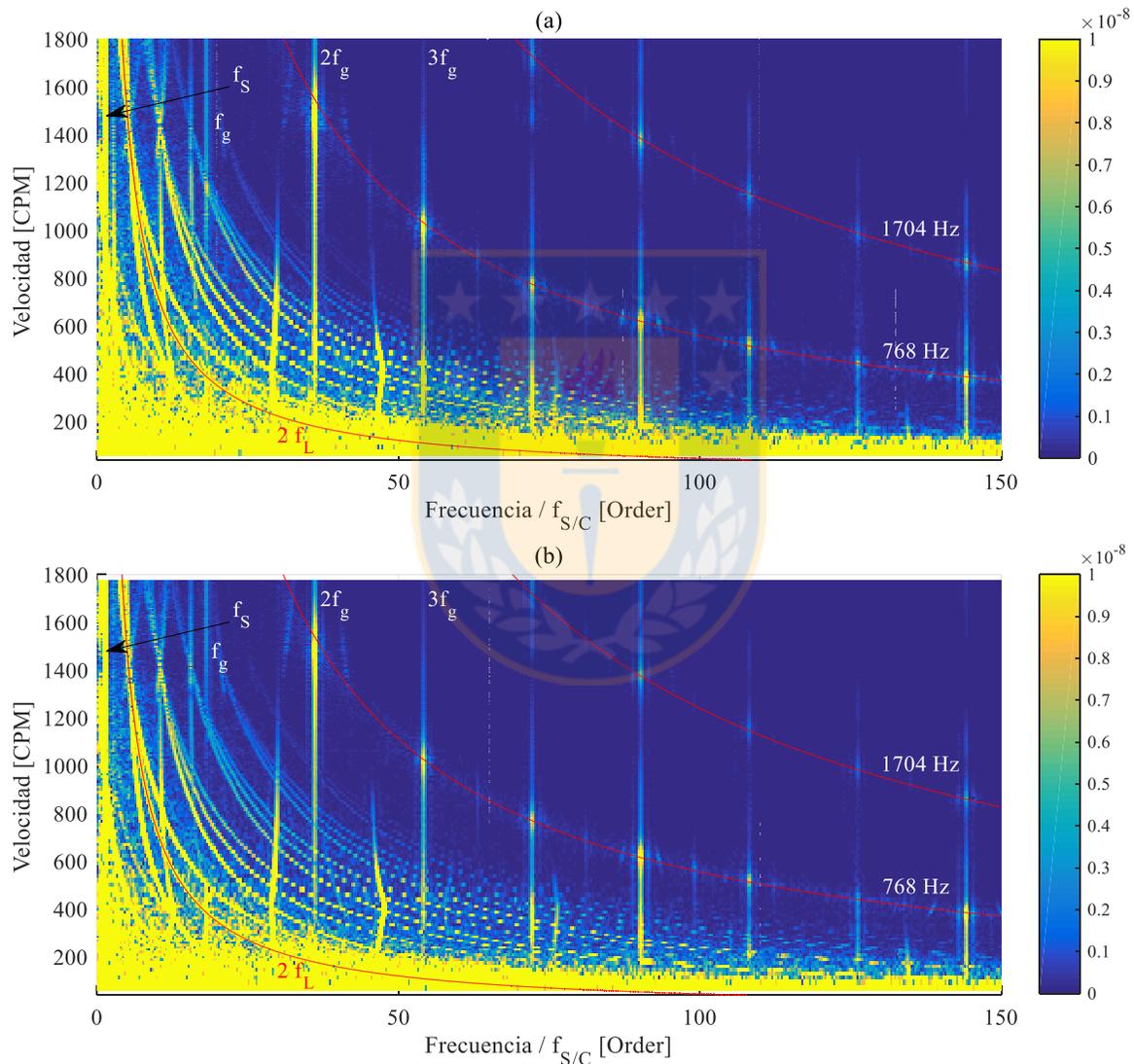


Figura 3.4. Transformada revolución-order de IAS, $P_{m\acute{a}x}$: (a) sano, (b) da\~{n}o en planeta, (c) da\~{n}o en sol y (d) da\~{n}o en anillo. ((c) y (d) en p\`{a}gina siguiente)

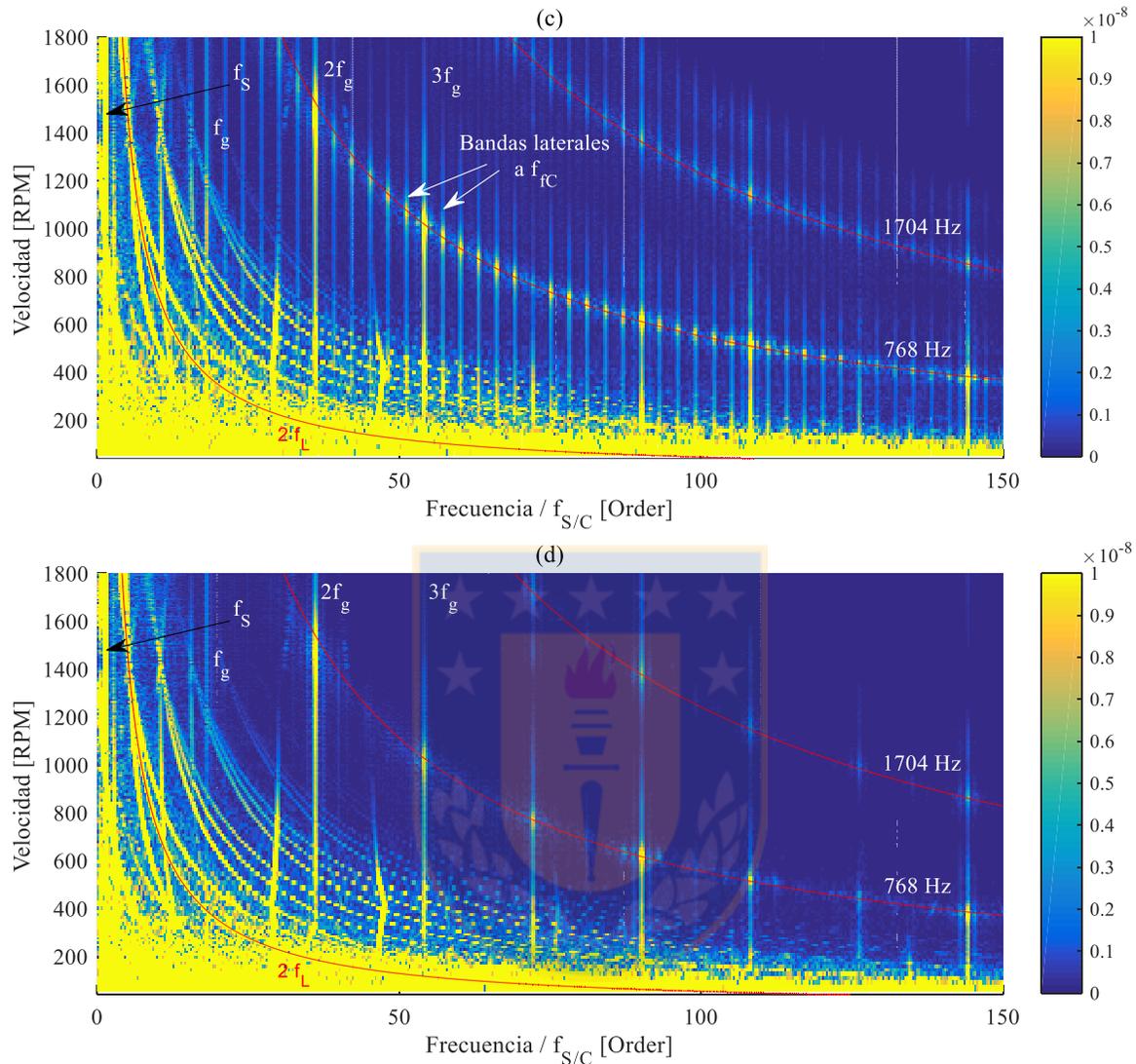


Figura 3.4.

Por otro lado, es posible observar al menos dos componentes más de frecuencia constante, de aproximadamente 768 [Hz] y 1724 [Hz], las cuales constituyen zonas resonantes y contribuyen de forma significativa cuando coinciden con alguna frecuencia de engrane.

De forma similar a lo ocurrido para los ensayos a velocidad constante, no se observa mayor diferencia a simple vista para los ensayos con estado sano, daño en planeta y daño en anillo (Figura 3.4(a), 3.3(b) y 3.3(d) respectivamente), siendo diferenciables la frecuencia de entrada f_S y armónicos de la frecuencia de engrane f_g . De igual forma, para el caso de daño en sol (Figura 3.4(c)) se distinguen adicionalmente bandas laterales a frecuencias de falla en sol en torno a f_g y sus armónicos.

Con el propósito de realizar un análisis del contenido espectral en más detalle, se analiza el espectro en orden para los distintos casos ensayados.

La Figura 3.5, muestra el espectro calculado a partir de 180 revoluciones del moto, mientras se encuentra rotando a una velocidad f_s de 1000 CPM y con una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}/2$.

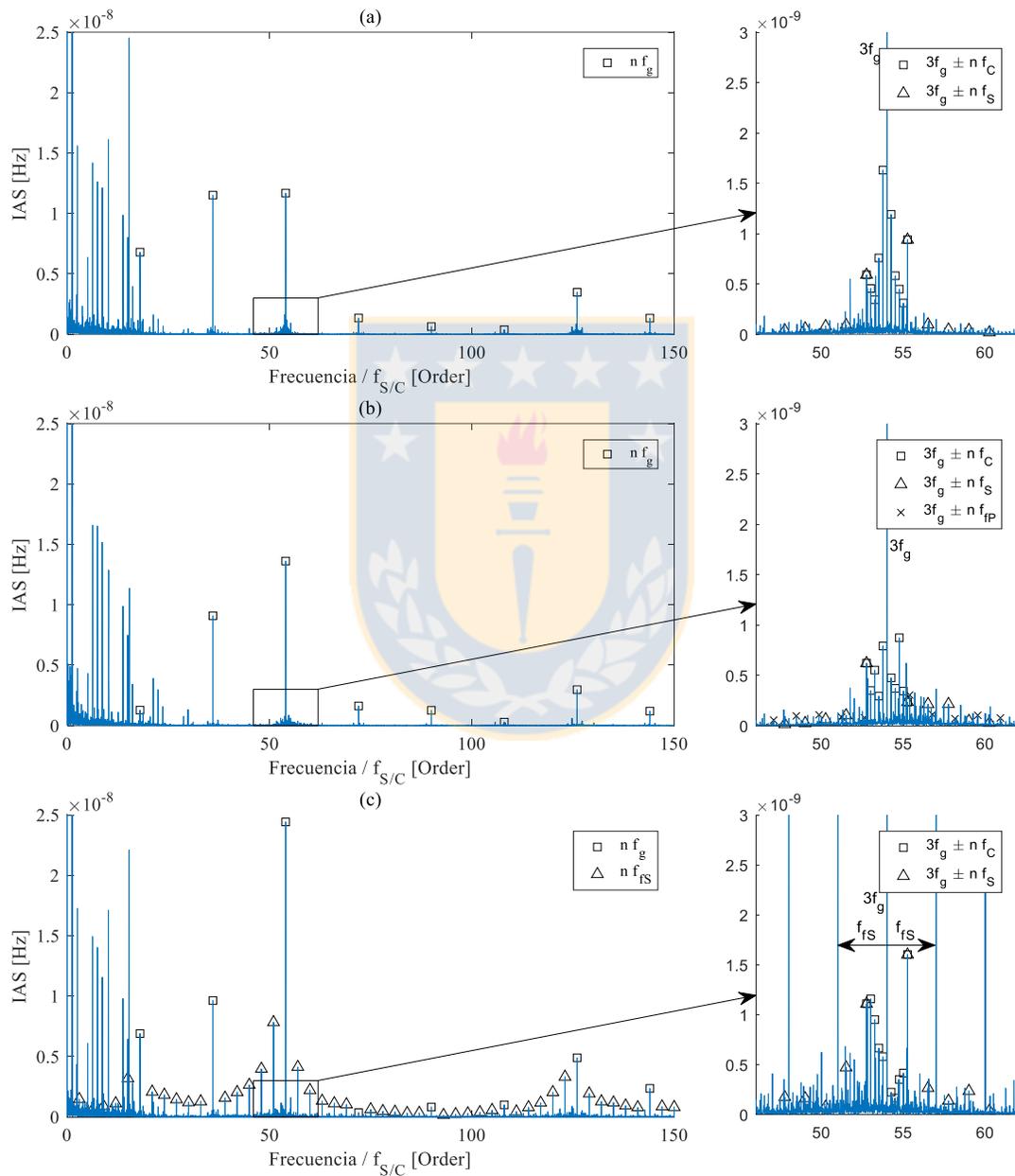


Figura 3.5. Espectro IAS, 1000 CPM, $P_{m\acute{a}x}/2$: (a) sano, (b) daño en planeta, (c) daño en sol y (d) daño en anillo. ((d) en página siguiente)

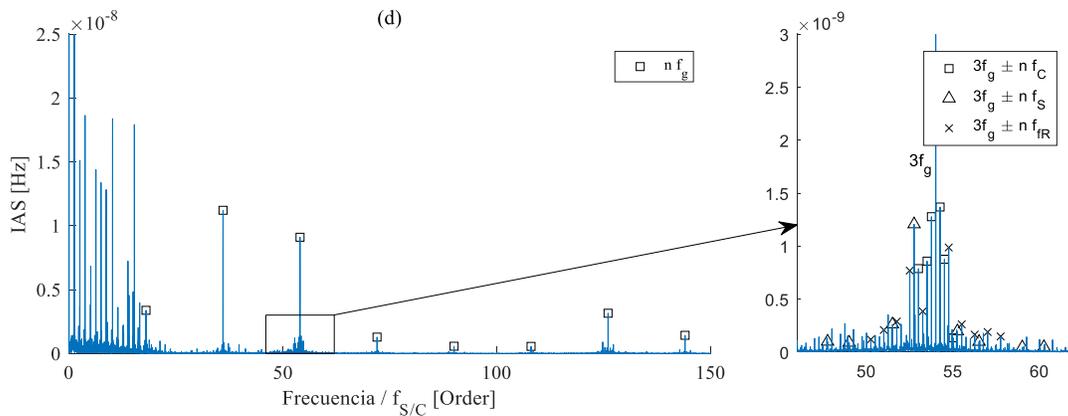


Figura 3.5.

De forma similar a lo visto a partir de las transformadas revolución-order, es posible identificar a simple vista, para cada condición de daño, componentes a la frecuencia de rotación del motor y armónicos de la frecuencia de engrane. Para el caso de daño en sol (Figura 3.5(c)) resaltan además las bandas laterales a la frecuencia de falla del sol.

De forma ampliada en la parte derecha de cada Figura, se puede observar más detalladamente lo que ocurre en cercanías del tercer armónico de la frecuencia de engrane, donde es posible distinguir bandas laterales de menor amplitud.

Para el caso de estado sano (Figura 3.5(a)), se observan bandas laterales a la frecuencia de rotación del eje de entrada f_S y a la frecuencia de rotación del eje de salida f_C , las que se consideran normales dentro de la operación.

Para el caso de daño en planeta (Figura 3.5(b)), además de las bandas laterales a f_S y f_C , se observan pequeñas bandas laterales a la frecuencia de falla en planeta f_{fP} , las cuales son difíciles de diferenciar debido a baja amplitud y cercanía con las bandas a f_C .

Para el caso de daño en sol (Figura 3.5(c)), se hace más sencillo identificar el daño, manifestado en las bandas laterales a la frecuencia de falla en el sol f_{fP} de gran amplitud.

Para el caso de daño en anillo (Figura 3.5(d)), de forma similar a lo visto para daño en planeta, se observan bandas laterales a la frecuencia de falla en anillo f_{fR} las cuales se mezclan con las bandas laterales a f_C lo que dificulta su reconocimiento.

Así, se puede concluir que a partir de un primer post-procesamiento, se logra identificar de forma sencilla una falla localizada en el sol. Sin embargo, fallas localizadas en planeta y anillo son más difíciles de identificar, requiriendo un análisis más específico.

3.3. Identificación del daño

Dado que las frecuencias de falla, especialmente en planeta y anillo, son difíciles de distinguir debido a su baja amplitud y la presencia cercana de bandas laterales a f_C que son normales a la operación, se hace necesario procesar la señal de tal forma de aislar las componentes de interés y dejar de lado componentes externas que no estén asociadas a la falla.

Así, con el fin de identificar de forma específica para cada ensayo el componente que se encuentra dañado, se propone el cálculo de promedios sincrónicos a la frecuencia de falla para cada uno de los componentes (f_{fP} , f_{fS} y f_{fR}), obteniendo de ésta forma una señal que es representativa de cada falla.

Espectralmente, la señal resultante estará compuesta por armónicos de la frecuencia de interés, lo que incluye frecuencias de engrane y bandas laterales a frecuencia de falla. A partir de esta señal, se calcula la señal residual, la cual elimina las componentes que son normales al proceso de engrane, tales como armónicos de la frecuencia de engrane y armónicos de la frecuencia fundamental. A partir de lo observado en Figura 3.3 y Figura 3.4, se define como frecuencia de corte pasa alto, la primera frecuencia de engrane para los ensayos a velocidad constante y la segunda frecuencia de engrane para los ensayos a potencia constante, esto con el fin de eliminar la contribución de las componentes eléctricas (armónicos de $2f_L$)

La Figura 3.6 muestra para un caso de falla en planeta la señal obtenida por promedios sincrónicos (Figura 3.6(a)) y su señal residual (Figura 3.6(b)).

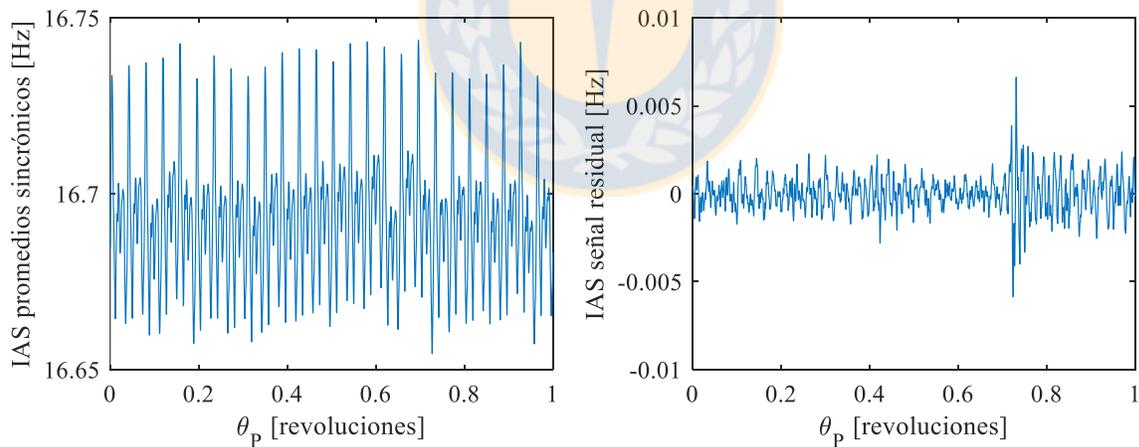


Figura 3.6. Falla en planeta: (a) promedios sincrónicos y (b) señal residual.

Se observa claramente como la señal residual permite distinguir a simple vista el daño, al quitar de la señal obtenida por promedios sincrónicos las componentes regulares propias del engrane.

3.3.1. Presentación de indicadores

En [Lebold *et al.* 2000] se presenta una revisión de los métodos recomendados para el diagnóstico de transmisiones planetarias aplicado a vibraciones transversales, donde se describen distintos indicadores que pueden ser considerados como parámetros para analizar las mediciones. Entre ellos se encuentran indicadores como el RMS, el valor pico a pico, el factor de cresta y el Kurtosis.

Se propone la evaluación del cálculo de los indicadores mencionados anteriormente aplicados sobre la señal residual obtenida para cada ensayo.

3.3.1.1. Valor RMS de la señal residual

El RMS de una señal corresponde a la raíz de la media cuadrática y describe el contenido de energía de la señal. Para señales discretas se define según:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (3.6)$$

donde x_{rms} corresponde al valor RMS de la señal x ; x_i corresponde a la amplitud del punto i de la señal, y N es el número de puntos de la señal.

En particular este parámetro no es recomendable para la detección de fallas incipientes, dado que para fallas localizadas, es de esperar que el valor RMS de la señal no varíe significativamente en comparación al estado sano. En este sentido, un cambio significativo en el valor RMS es indicativo de una falla acentuada o de una falla distribuida sobre toda la rueda.

3.3.1.2. Valor pico a pico de la señal residual

El valor pico a pico corresponde a la amplitud desde valle a cresta de la señal. Se define como la diferencia entre su pico o máximo positivo y su pico negativo:

$$x_{pico-pico} = Máx(x) - Mín(x), \quad (3.7)$$

donde $x_{pico-pico}$ es el valor pico a pico de la señal x .

3.3.1.3. Factor de cresta de la señal residual

El factor de cresta indica el daño en etapas tempranas. Se define como el valor pico a pico de la señal, dividido por el valor RMS de la misma:

$$FC = \frac{x_{pico-pico}}{x_{RMS}}, \quad (3.8)$$

donde FC es el factor de cresta.

3.3.1.4. Kurtosis de la señal residual

La Kurtosis describe que tan aguda o plana es una distribución estadística, incrementa cuando aparecen síntomas de daño localizado. Se define como:

$$Kurtosis = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)^2}, \quad (3.9)$$

donde x_i corresponde a término i de la señal x ; \bar{x} es la media de la señal, y N es el número de puntos de la señal.

3.3.2. Evaluación de indicadores

Con el fin de evaluar la efectividad de cada indicador en la detección de falla, se comparan los valores de los indicadores para cada caso ensayado. El procedimiento para el procesamiento de la señal consiste en tomar tramos de la señal que contengan 40 revoluciones del eje de entrada, utilizando 90% de traslapeo. Para cada tramo se calcula el promedio sincrónico sobre la frecuencia de falla de interés y se obtiene la señal residual para posteriormente realizar el cálculo de los indicadores.

3.3.2.1. Evaluación de indicadores, caso velocidad constante

En la Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9 se muestran los valores obtenidos del cálculo de indicadores para los ensayos a velocidad constante. Si para un mismo ensayo, a la misma velocidad y con igual carga, se obtiene un valor mayor al calcular un indicador sobre la transmisión con daño que sobre la transmisión sana, entonces se considera que el indicador permite identificar el daño. Entre mayor sea la diferencia obtenida, más sensible es el indicador, y por lo tanto, más útil para la detección del daño.

La Figura 3.7, muestra los valores obtenidos para el caso de daño en planeta, para una velocidad del motor $f_s = 1000$ CPM. Se observa que el cálculo del valor RMS de la señal no indica una clara diferencia entre el caso sano y el caso con daño. Para el resto de indicadores, se evidencia una marcada diferencia entre los valores obtenidos para el caso sano y el caso con daño para cualquier valor de potencia, lo que muestra que son indicadores que pueden ser usados para encontrar el daño. Especialmente, el factor de cresta entrega mejores resultados, mostrando una diferencia en el valor para el caso con daño en comparación con el caso sano prácticamente constante para todo el rango de potencia estudiado.

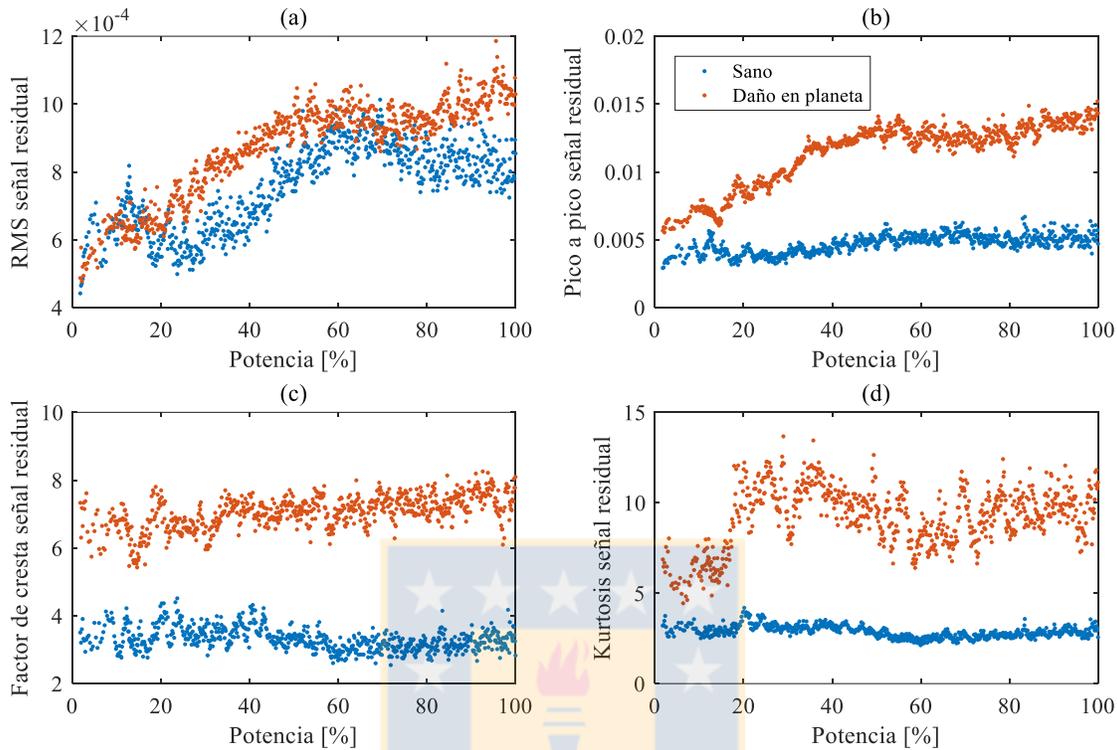


Figura 3.7. Indicadores de daño para falla en planeta, $f_s = 1000$ CPM: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.

La Figura 3.8, muestra los valores obtenidos para el caso de daño en sol, para una velocidad del motor $f_s = 1000$ CPM. Conforme a lo esperado a partir del análisis hecho en el post-procesamiento, el daño en el sol es fácilmente identificable, utilizando cualquier indicador. Particularmente, el valor RMS y el valor pico a pico de la señal residual muestran una amplia diferencia entre los estados sano y con daño. Por otro lado, los cálculos de factor de cresta y kurtosis de la señal residual, muestran que para bajos valores de carga permiten detectar la falla. Sin embargo, a medida que aumenta la carga se observa una disminución de los valores entregados por los indicadores para el caso con falla, alcanzando niveles similares al caso sano, y por ende, complicando la identificación del daño. Al analizar en conjunto los datos entregados por los indicadores, se observa que la disminución del valor del kurtosis al aumentar la carga, es consecuencia de la obtención de una señal menos “impactiva”, el valor RMS de la señal aumenta considerablemente, en tanto la amplitud de los impactos producto del daño localizado engranando aumenta en mucho menor medida. De esta forma, se concluye que para identificar un daño en el sol, es recomendable el cálculo del valor RMS o del valor pico a pico de la señal residual, pese a que constituyen un reflejo del aumento de la energía de la señal más que de la detección de impactos producto de un daño localizado.

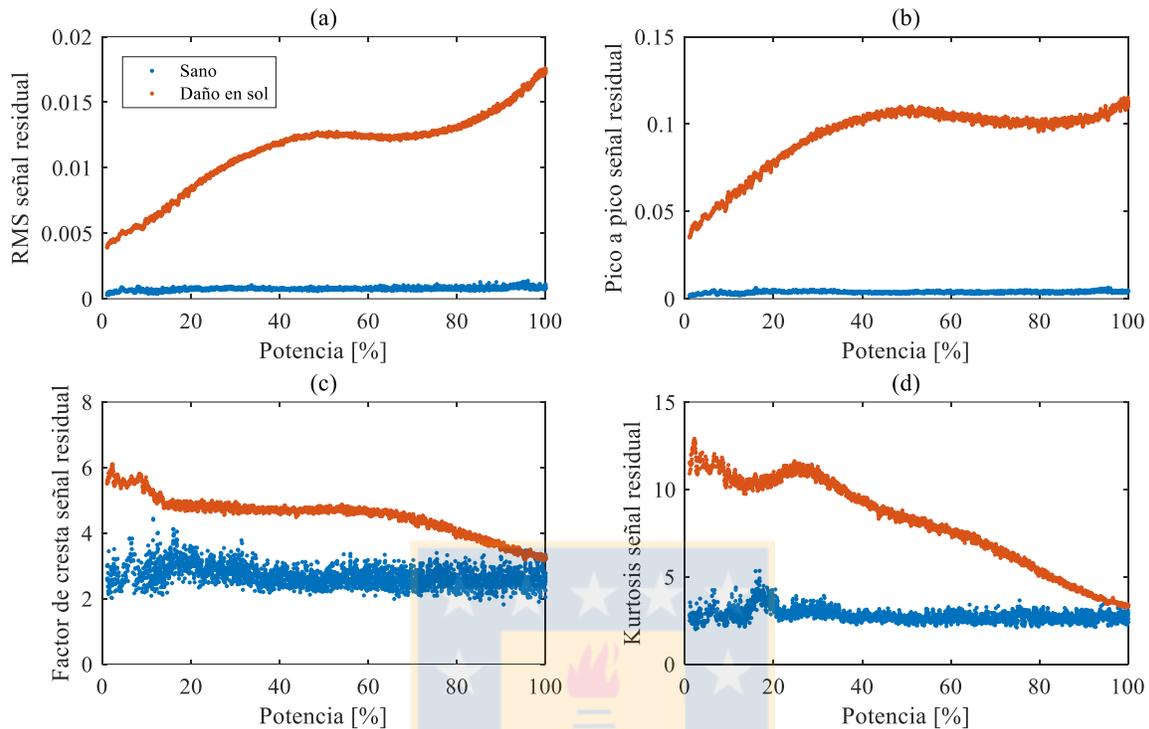


Figura 3.8. Indicadores de daño para falla en sol, $f_S = 1000$ CPM: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.

La Figura 3.9, muestra los valores obtenidos para el caso de daño en anillo, para una velocidad del motor $f_S = 1000$ CPM. Los resultados muestran que fallas localizadas en el anillo son difíciles de identificar, dado que los valores calculados para el caso con daño son similares a los obtenidos para el caso sano. Los indicadores factor de cresta y kurtosis muestran valores que son indistinguibles de una transmisión sana o con daño. Los valores RMS y pico a pico de la señal residual obtenidos muestran una pequeña diferencia entre los estados sano y con daño. Así, para la identificación de un daño localizado en el anillo, se recomienda, al igual que para identificar un daño en el sol, el cálculo del valor RMS o del valor pico a pico de la señal residual.

3.3.2.2. Evaluación de indicadores, caso potencia constante

En la Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12, se muestran los valores obtenidos del cálculo de indicadores para los ensayos a potencia constante.

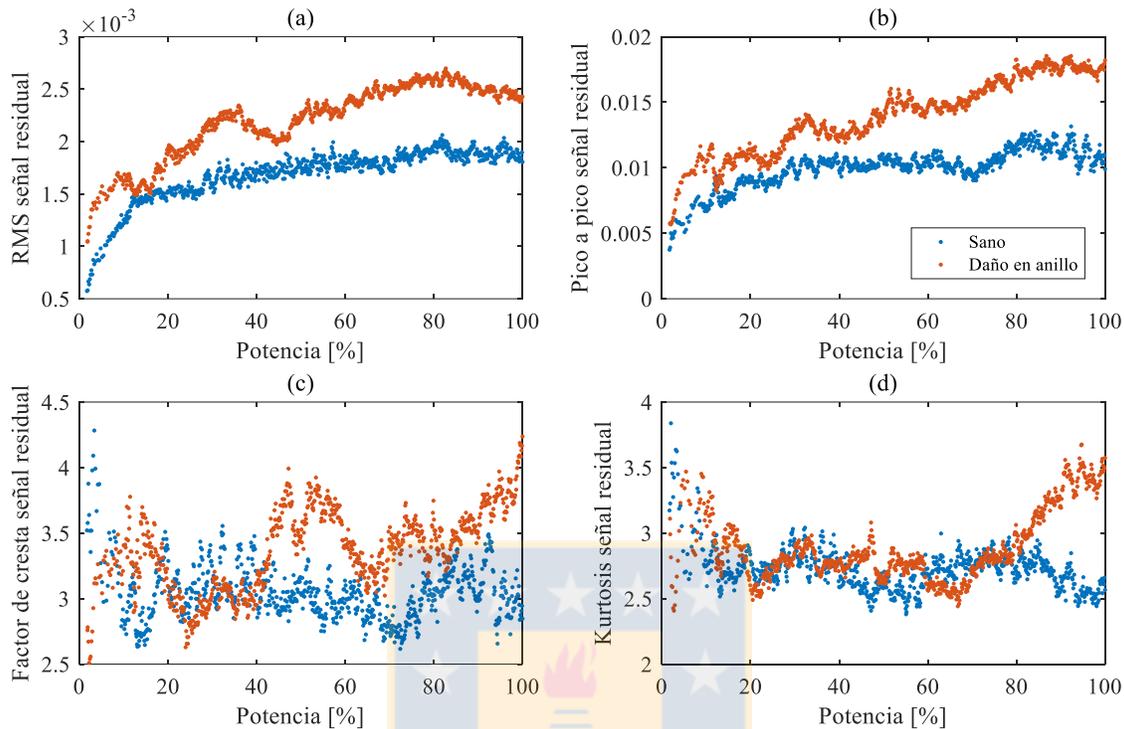


Figura 3.9. Indicadores de daño para falla en anillo, $f_s = 1000$ CPM: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.

La Figura 3.10, muestra los valores obtenidos para el caso de daño en planeta, para una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$. Se observa que para velocidades del motor bajas, ninguno de los indicadores estudiados permite diferenciar una transmisión con daño de una sana. Esto se entiende al observar las transformadas revolución-order obtenidas para velocidad variable (Figura 3.4), donde a bajas velocidades del motor existe principalmente una contribución de componentes eléctricas, las cuales además alcanzan altos orden, impidiendo la identificación de componentes propias del proceso de engrane. Este fenómeno ocurre hasta que se alcanza aproximadamente los 600 CPM en el motor. A dicha velocidad, las componentes eléctricas se encuentran bajo la $2f_g$ que corresponde al límite pasa alto que se definió para el cálculo de la señal residual para los ensayos a velocidad variable.

Para los valores RMS calculados (Figura 3.10(a)), se observa que no es posible identificar el daño, puesto que los valores obtenidos al calcular el valor RMS para el caso con daño son altamente similares a los calculados para el caso sano. Para el resto de los indicadores estudiados, se observa que es posible distinguir el daño para velocidades del motor superiores a los 600 CPM. Es interesante observar que en torno a los 1500 CPM aproximadamente, los indicadores para los casos con falla y sanos muestran valores similares, impidiendo la identificación del daño. Por un lado, el valor pico a pico del caso sano experimenta un aumento abrupto, igualando los valores para el caso con daño; por otra parte, los valores factor de cresta y kurtosis obtenidos para el caso con daño, experimentan una disminución en torno a los

1500 CPM, obteniendo los mismos valores que para el estado sano. Esto se debe a que a dicha velocidad, una de las zonas resonantes coincide con el primer armónico de la frecuencia de engrane, lo que implica un aumento de amplitud de dicha frecuencia de engrane y de sus bandas laterales, a tal punto que vibratoriamente no se diferencia una transmisión con daño de una transmisión sana. Se concluye que para velocidades del motor sobre los 600 CPM, es posible identificar una falla localizada en planeta mediante el cálculo de indicadores como el valor pico a pico, factor de cresta o kurtosis; salvo cuando una frecuencia de engrane coincide con una zona resonante, situación en que no es posible la detección de la falla.

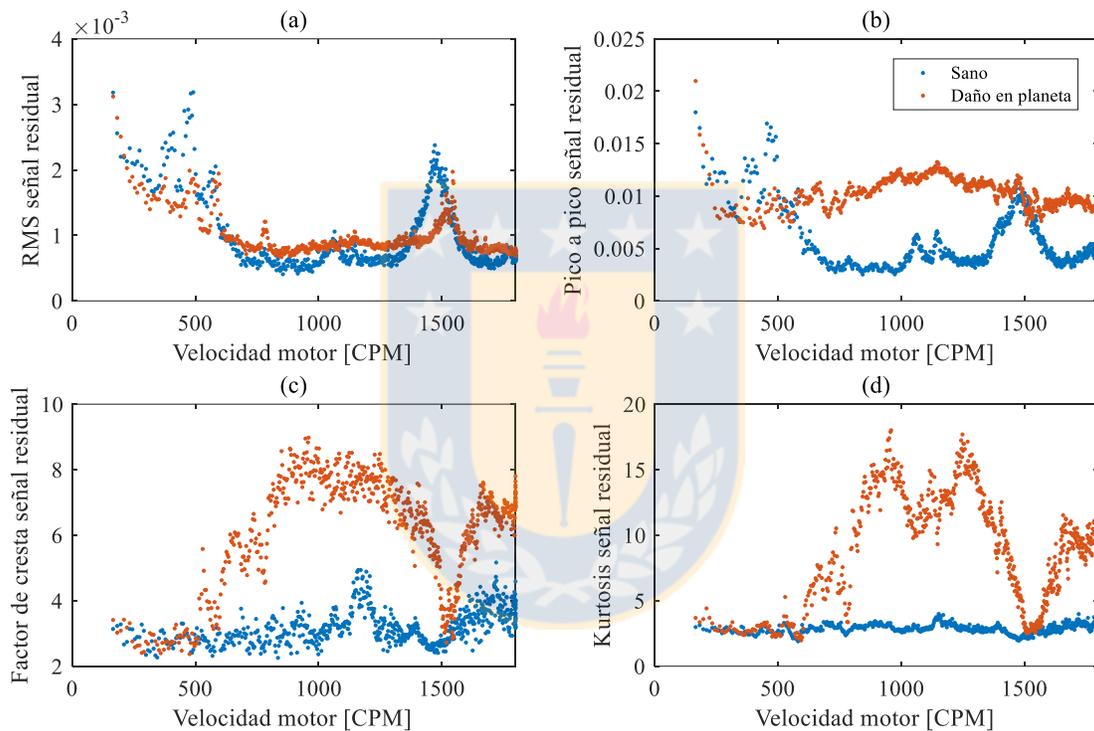


Figura 3.10. Indicadores de daño para falla en planeta, $P_{m\acute{a}x}$: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.

La Figura 3.11, muestra los valores obtenidos para el caso de daño en sol, para una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$. De forma similar a lo observado al analizar los indicadores calculados para los ensayos a velocidad constante, se logra identificar de manera clara una falla localizada en el sol. El cálculo del factor de cresta y del kurtosis de la señal residual muestra una diferencia entre lo obtenido para el caso con daño en comparación al caso sano, la cual puede ser analizada por tramos. De forma contraria a lo observado para el caso de daño en planeta (Figura 3.10), para velocidades del motor bajo los 600 CPM, los indicadores factor de cresta y kurtosis muestran una marcada diferencia, siendo útiles en la detección de la falla; para

velocidades superiores, se mantiene una diferencia pero de bastante menor magnitud. Para el caso del cálculo del valor RMS o del valor pico a pico se puede realizar el mismo análisis por tramos: para velocidades del motor bajo los 600 CPM, se observa una diferencia en el cálculo de indicadores relativamente baja, al cual aumenta de forma gradual a medida que se aumenta la velocidad del motor; para velocidades por sobre los 600 CPM aproximadamente, se mantiene una diferencia entre indicadores considerablemente amplia. De esta forma, se observa un complemento positivo en el desempeño de los indicadores, para velocidades del motor bajo los 600 CPM, los indicadores factor de cresta y kurtosis entregan los mejores resultados en la detección de un daño localizado en el sol; para velocidades sobre los 600 CPM en tanto, los indicadores valor RMS y valor pico a pico son más claros en la identificación del daño.

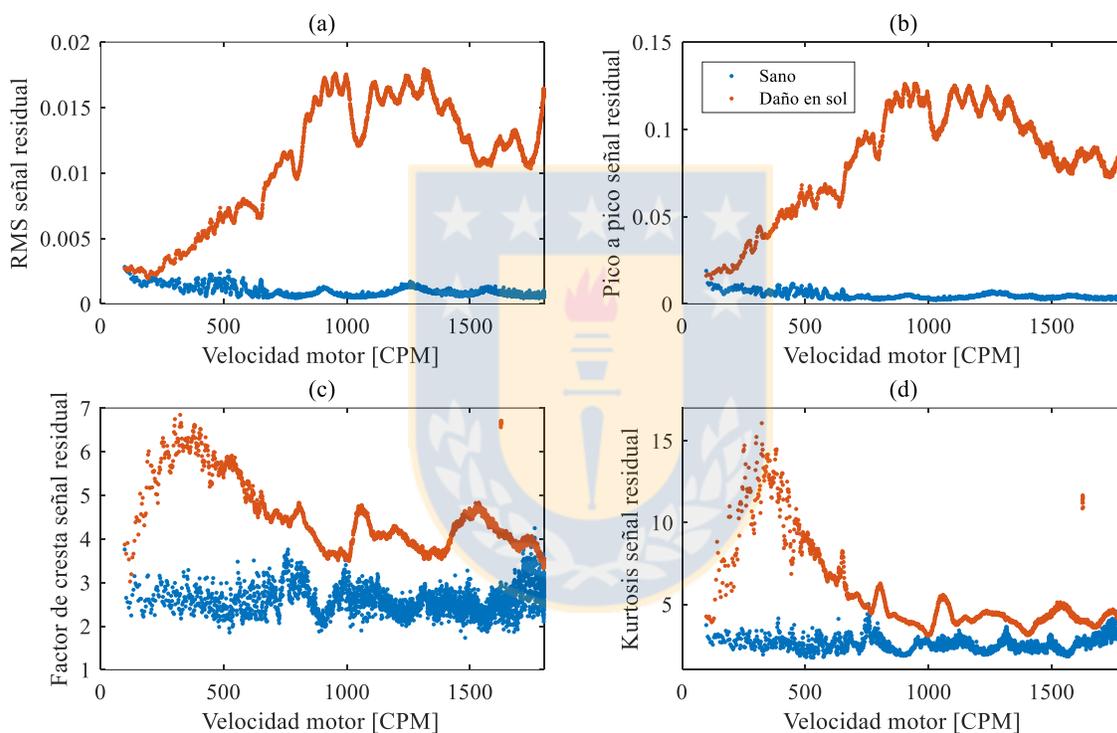


Figura 3.11. Indicadores de daño para falla en sol, $P_{m\acute{a}x}$: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.

La Figura 3.12, muestra los valores obtenidos para el caso de daño en anillo, para una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$. Se observa que el cálculo del indicador factor de cresta no permite la identificación de una falla localizada en anillo, obteniendo valores para el caso dañado indistinguibles de los valores obtenidos para el caso sano. Para el caso del indicador kurtosis, se observa que entrega resultados favorables para un rango de velocidades muy acotado, desde los 800 CPM hasta los 1050 CPM aproximadamente, lo que lo hace poco práctico. Para el caso de los indicadores RMS y pico a pico, se observa que para velocidades del motor bajo los 600 CPM, el daño no es identificable, en tanto, para velocidades superiores a los 600

CPM, se observa una pequeña diferencia que permite encontrar un daño, aunque con cierta dificultad. Se observa además que cuando se alcanza una velocidad de 1500 CPM aproximadamente, lo que corresponde al paso de la zona resonante por la frecuencia de engrane, el valor obtenido para los indicadores experimenta un alza tanto para los ensayos con falla y sano, que se escapa de la evolución normal del indicador a medida que se aumenta la velocidad. Se recomienda la evaluación de los indicadores RMS y valor pico a pico para la identificación de una falla localizada en anillo.

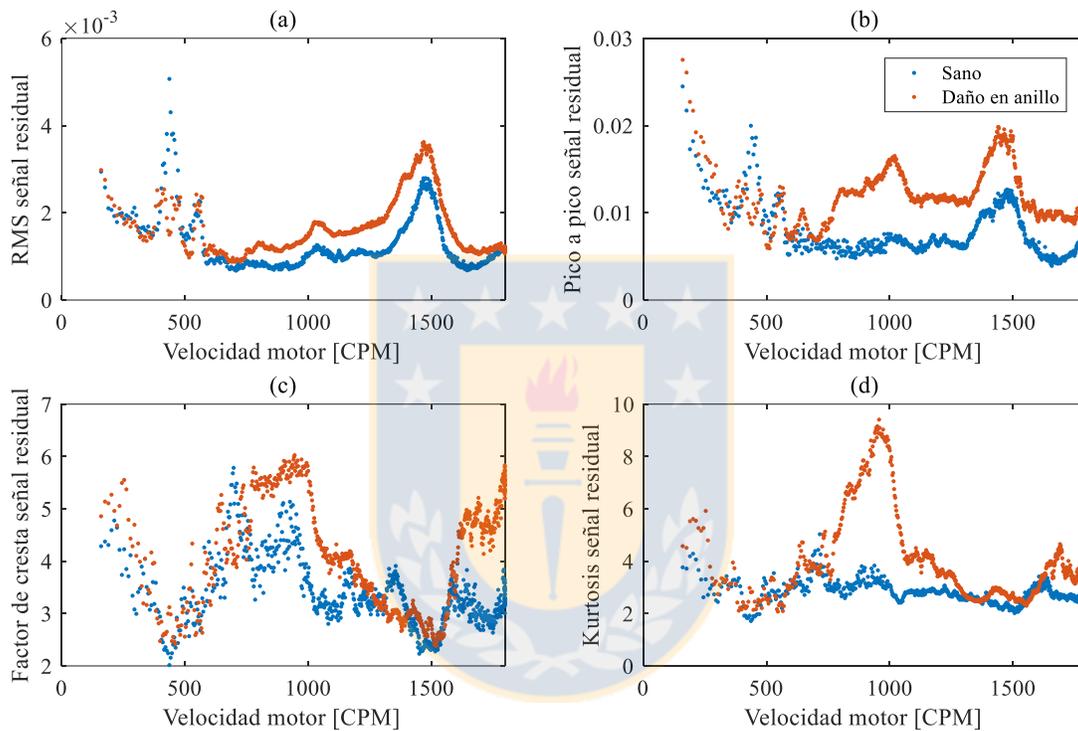


Figura 3.12. Indicadores de daño para falla en anillo, $P_{m\acute{a}x}$: (a) RMS señal residual, (b) pico a pico, (c) factor de cresta y (d) kurtosis.

A modo de resumen, en la Tabla 3.1, se muestran los indicadores que permiten la identificación del daño para cada grupo de ensayos analizado. El número de la columna señala el orden según sea mejor o peor en la identificación del daño. Así, para el ensayo con potencia variable y daño en sol, el indicador que mejores resultados entrega es el valor pico a pico y el que peores resultados entrega es el factor de cresta.

Al evaluar la capacidad de los indicadores para la identificación de una falla localizada para cada uno de los ensayos, se concluye que el indicador que entrega mejores resultados es el valor pico a pico, y se utilizará como indicador para la identificación de una falla en la transmisión.

Tabla 3.1. Coeficientes curva de base.

Ensayo	Componente dañado	1	2	3	4
Potencia variable	Planeta	Factor de cresta	Pico a pico	Kurtosis	-
	Sol	Pico a pico	RMS	Kurtosis	Factor de cresta
	Anillo	RMS	Pico a pico	-	-
Velocidad variable	Planeta	Kurtosis	Pico a pico	Factor de cresta	-
	Sol	Pico a pico	RMS	Factor de cresta	Kurtosis
	Anillo	Pico a pico	RMS	-	-

3.3.3. Normalización de indicador

Con el propósito de poder encontrar el componente dañado para cada ensayo realizado, se evalúa para cada componente de interés el resultado de la razón entre el cálculo del indicador para el ensayo estudiado y lo esperado para una transmisión sana. Esto es, evaluar el indicador sobre la señal residual obtenida del promedio sincrónico a la frecuencia de falla del componente de interés y dividirlo por el resultado del indicador obtenido para una transmisión sana bajo la misma condición de operación. Se entiende que si la razón obtenida tiene un valor aproximado de 1, el componente estudiado se encuentra sano; por otro lado, si la razón es mayor que 1, existe algún grado de daño sobre el componente.

Con el fin de normalizar de alguna forma los resultados obtenidos del cálculo de indicadores para cada ensayo, a modo de hacerlos comparables entre distintos componentes de interés, se calcula una curva de base para los distintos ensayos, tomando como referencia los ensayos realizados en estado sano. La curva es obtenida a partir de un ajuste con una función potencia de la forma $f(x) = a * x^b + c$ de los indicadores calculados.

La Figura 3.13 muestra las distintas curvas obtenidas para los ensayos de potencia variable. En tanto, la Figura 3.14 muestra las distintas curvas obtenidas para los ensayos de velocidad variable.

En general, se observa una mayor variación para los indicadores calculados en los casos de velocidad variable. Esto debido a que para velocidades bajas se tiene una alta contribución de componentes eléctricas que coinciden con frecuencias de engrane; y a velocidades más altas, la coincidencia de primeros armónicos de la frecuencia de engrane con zonas resonantes de la transmisión, producen un aumento significativo del nivel de vibraciones para rangos de velocidad acotados. En tanto, para el caso de potencia variable, se observa que la evolución del valor pico a pico se mantiene prácticamente invariable con el cambio de potencia.

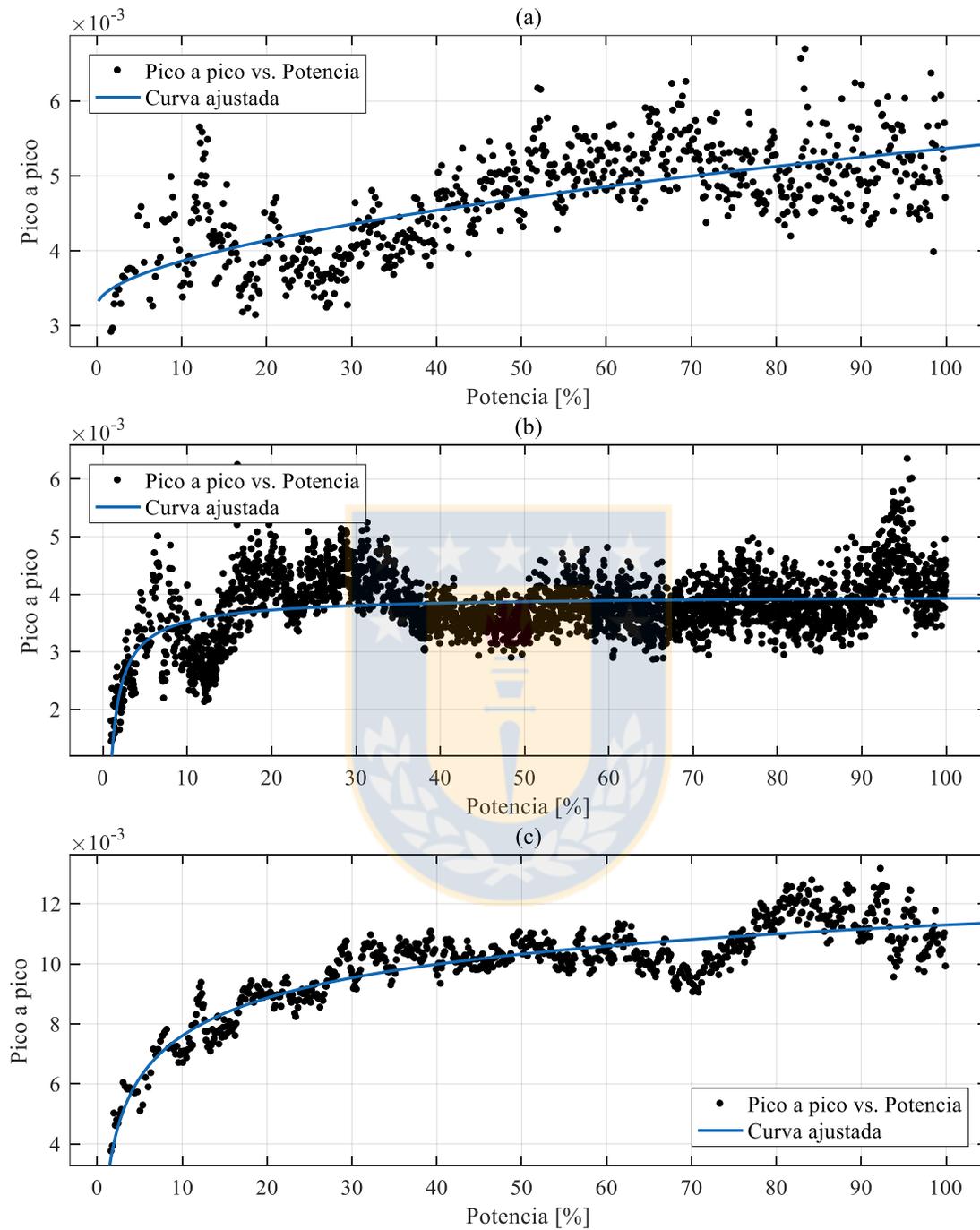


Figura 3.13. Curva base de ensayos con potencia variable, transmisión sana, $f_S = 1000$ CPM: (a) sincrónico al planeta, (b) sincrónico al sol y (c) sincrónico al anillo.

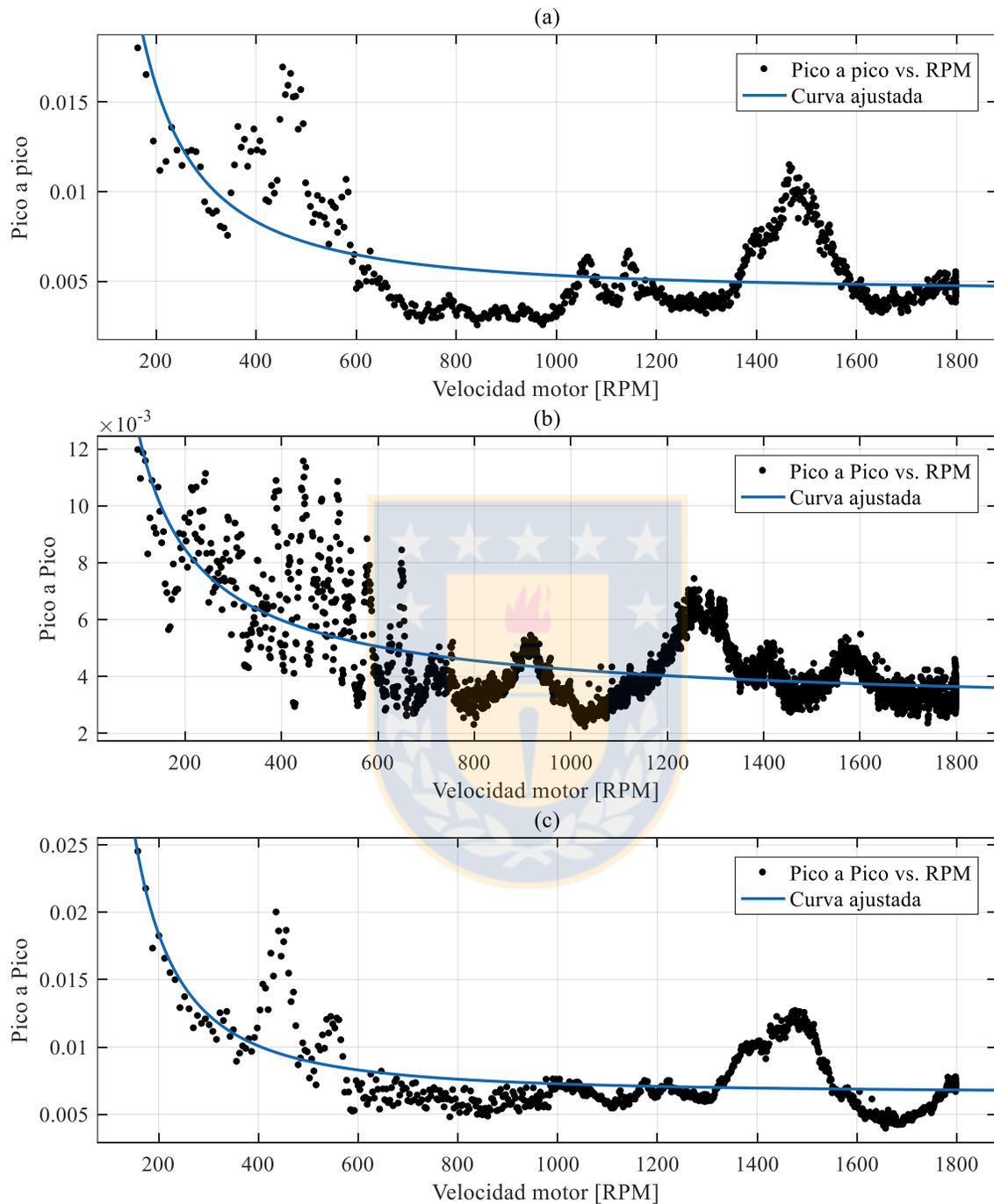


Figura 3.14. Curva base de ensayos con velocidad variable, transmisión sana, $P_{m\acute{a}x}$: (a) sincrónico al planeta, (b) sincrónico al sol y (c) sincrónico al anillo.

La Tabla 3.2 muestra el valor de los coeficientes obtenidos para la construcción de la curva de base para cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 3.2. Coeficientes curva de base.

Ensayo	Sincrónico	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Potencia variable	Planeta	0,0001725	0,5439	0,003257
	Sol	-0,002946	-0,7803	0,00401
	Anillo	-0,01739	-0,1587	0,01967
Velocidad variable	Planeta	41,42	-1,545	0,004366
	Sol	0,4164	-0,8063	0,002656
	Anillo	123,7	-1,747	0,006554

3.3.4. Ensayos con potencia variable

Se estudian los ensayos con potencia variable, se analiza cada condición de forma particular (daño en planeta, sol y anillo) con el fin de poder identificar el daño y poder discriminar el componente que lo contiene.

3.3.4.1. Daño en planeta

Se calcula el valor pico a pico normalizado por la curva de base obtenida anteriormente. La Figura 3.15 muestra los resultados obtenidos para el ensayo con daño en planeta a una velocidad del motor f_s de 1000 CPM.

Se observa que cuando se analiza la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del planeta, se encuentra el daño con éxito, evidenciado por un aumento de entre un 100% y un 150% en el valor pico a pico calculado, en comparación a la curva de base determinada para el estado sano. En tanto, al analizar la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del sol o del anillo, no se distingue un cambio en el indicador, obteniendo un valor pico a pico normalizado similar a 1 para todo el rango estudiado, lo que significa que no existe daño.

3.3.4.2. Daño en sol

La Figura 3.16 muestra el valor pico a pico normalizado, obtenido para el ensayo con daño en sol a una velocidad del motor f_s de 1000 CPM.

Se observa que cuando se analiza la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del anillo, no se distingue un aumento significativo en el indicador, el valor pico a pico normalizado se mantiene cercano a 1 en todo el rango, lo que significa que no existe daño. La curva sincrónica al planeta, muestra un aumento aproximado del valor pico a pico de un 80% en comparación a lo obtenido en estado sano, lo que puede dar una falsa alarma de daño en planeta. Al analizar la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del sol, se obtiene un aumento de entre un 1500% y un 2500% en el valor pico a pico

calculado, en comparación a la curva de base determinada para el estado sano, lo que es señal inequívoca de la presencia de un daño en el sol.

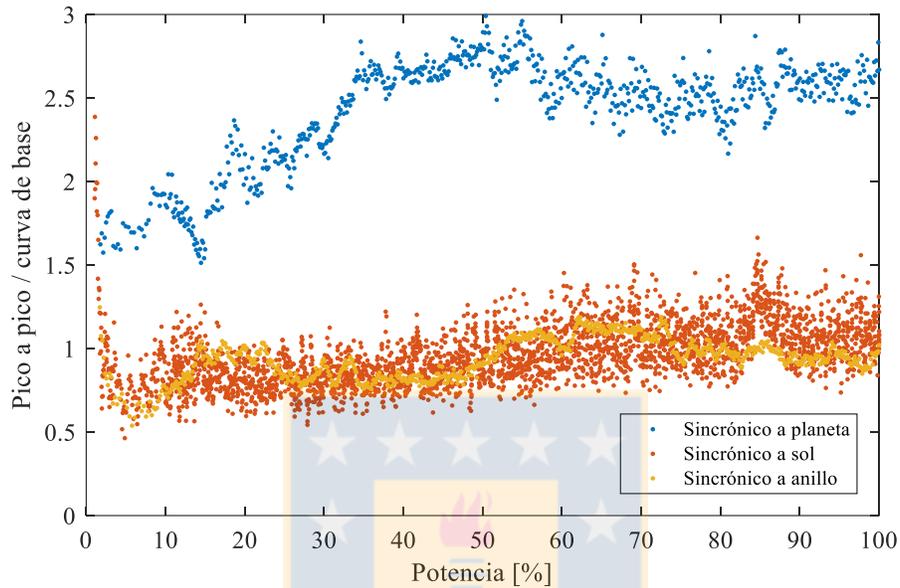


Figura 3.15. Valor pico a pico normalizado, caso daño en planeta, $f_S = 1000$ CPM.

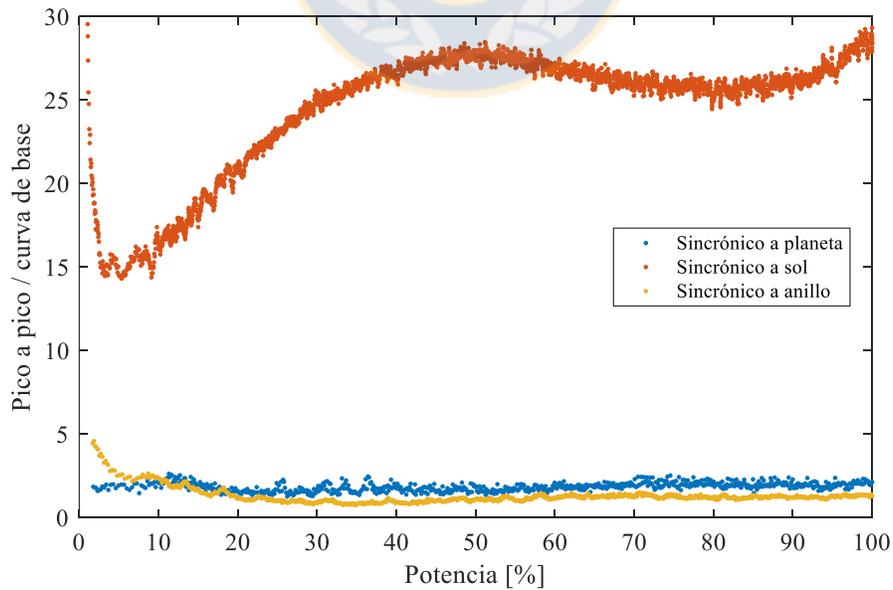


Figura 3.16. Valor pico a pico normalizado, caso daño en sol, $f_S = 1000$ CPM.

3.3.4.3. Daño en anillo

La Figura 3.17 muestra el valor pico a pico normalizado, obtenido para el ensayo con daño en anillo a una velocidad del motor f_S de 1000 CPM.

Se observa que la identificación de un daño en anillo es menos evidente que para los otros casos estudiados, el valor pico a pico para la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del anillo, experimenta un aumento de entre un 20% hasta un 60%, en comparación a la curva de base en estado sano, el cual varía prácticamente de forma lineal con el aumento en la carga. Para el caso de la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del sol, la evolución del indicador con la carga es similar al observado para la señal sincrónica al anillo. Para potencias bajas se obtiene un valor pico a pico normalizado similar a 1, en tanto, para potencias altas, el valor pico a pico normalizado alcanza un valor cercano a 1,4, lo que corresponde a un aumento de un 40% en el valor obtenido en comparación al estado sano. Se descarta daño en sol, ya que como se observó en la Figura 3.15, con daño en sol se obtiene un aumento del valor pico a pico de al menos un 1500%. Para el caso de la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del planeta, el indicador normalizado mantiene un valor bajo a 1 para todo el rango estudiado, evidenciando que el componente está sano.

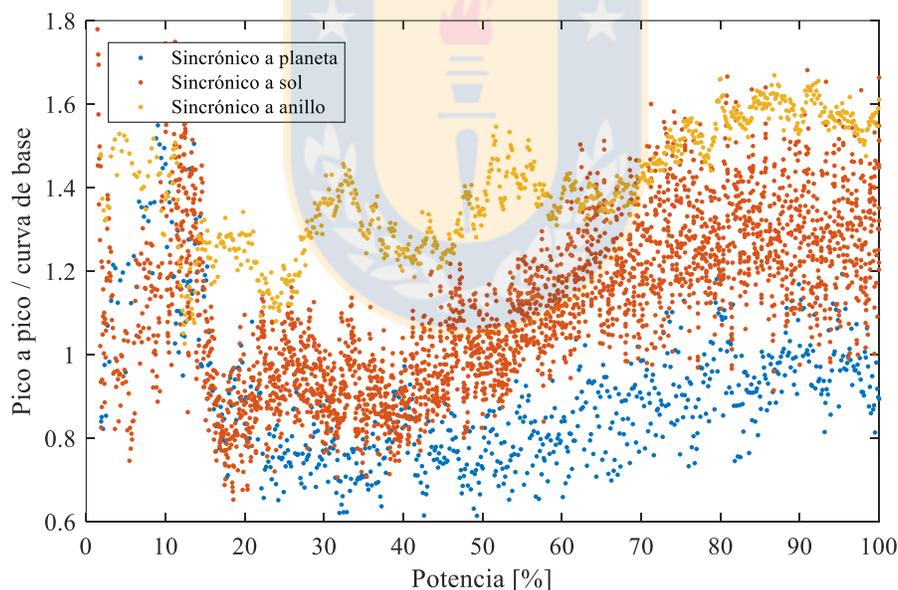


Figura 3.17. Valor pico a pico normalizado, caso daño en anillo, $f_S = 1000$ CPM.

3.3.5. Ensayos con velocidad variable

Se estudian los ensayos con velocidad variable, se analiza cada condición de forma particular (daño en planeta, sol y anillo) con el fin de poder identificar el daño y poder discriminar el componente que lo contiene.

3.3.5.1. Daño en planeta

La Figura 3.18 muestra los resultados obtenidos para el ensayo con daño en planeta para una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$.

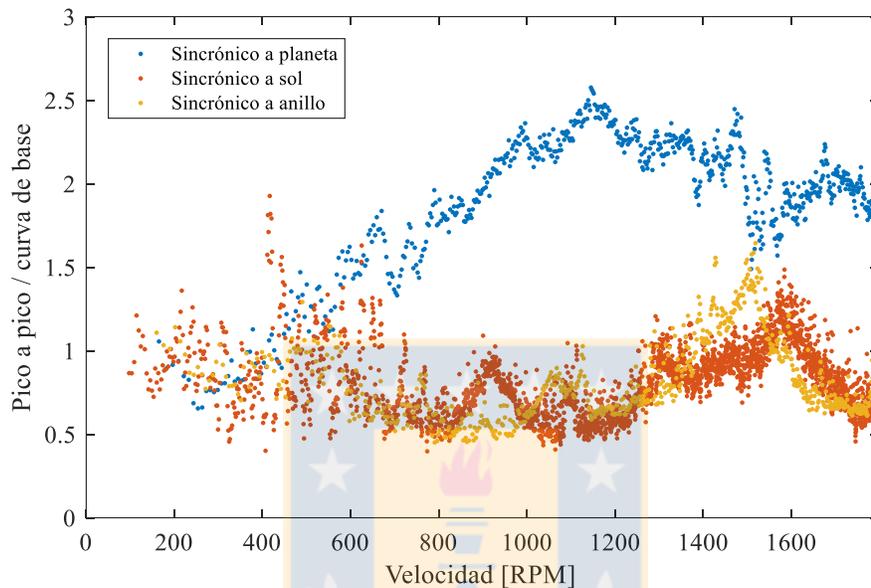


Figura 3.18. Valor pico a pico normalizado, caso daño en planeta, potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$.

Se observa que para velocidades del motor de hasta 600 CPM, no se identifica el daño, los tres cálculos realizados arrojan valores pico a pico normalizados similares a 1. Para velocidades superiores a 600 CPM, la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del planeta, muestra un aumento de entre un 100% y un 150% en el valor pico a pico calculado, en comparación a la curva de base determinada para el estado sano, lo que indica que existe un daño en el componente. Para el caso de la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del sol y el anillo, el valor pico a pico normalizado se mantiene cercano a 1, indicando que los componentes se encuentran sanos. Al llegar a los 1550 CPM aproximadamente, se observa un aumento del indicador, lo que corresponde a la coincidencia de una zona resonante con la segunda frecuencia de engrane $2f_g$, para esta condición, los tres cálculos entregan valores similares y la falla no puede ser detectada.

3.3.5.2. Daño en sol

La Figura 3.19 muestra los resultados obtenidos para el ensayo con daño en sol para una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$.

Se observa que la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del planeta y el anillo muestra un valor pico a pico normalizado similar a 1 para todo el rango estudiado, indicando que no existe daño en los componentes. Para el caso de la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del sol, se observa que para velocidades menores a 800 CPM aproximadamente, el valor pico a pico normalizado aumenta de forma prácticamente lineal desde 1 hasta 25 aproximadamente, a partir de este punto se mantiene en torno a los 25, esto muestra que el daño en el sol puede ser identificado para prácticamente cualquier condición de operación.

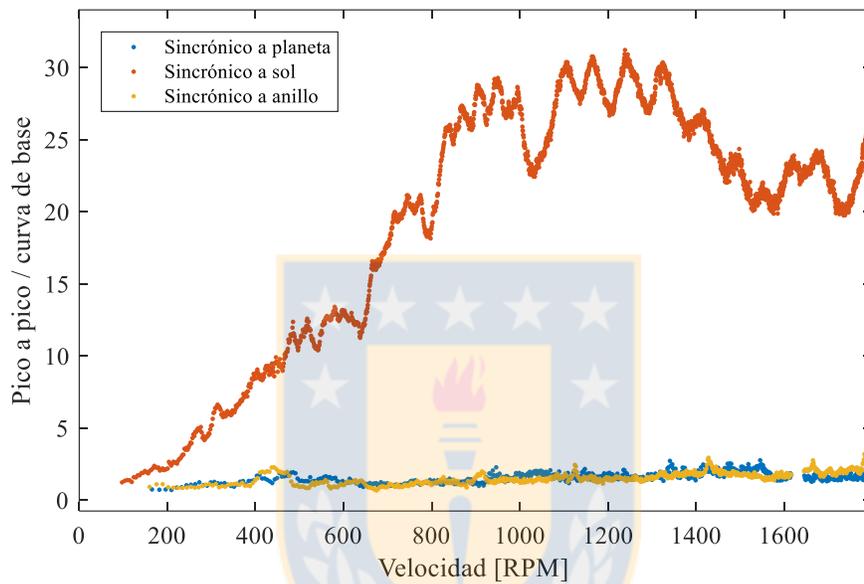


Figura 3.19. Valor pico a pico normalizado, caso daño en sol, potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$.

3.3.5.3. Daño en anillo

La Figura 3.20 muestra los resultados obtenidos para el ensayo con daño en anillo para una potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$.

De forma similar a lo que ocurre con el daño en planeta y velocidad variable, se observa que para velocidades del motor de hasta unos 600 CPM, no se identifica el daño, dado que los tres indicadores normalizados arrojan valores pico a pico normalizados similares a 1 debido a la predominancia de las componentes eléctricas. Se observa que cuando se analiza la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del planeta y el sol, no existe un mayor cambio en el indicador, lo que indica que los componentes no están dañados. En el caso del análisis de la señal promediada sincrónica a la frecuencia de falla del anillo, se observa que para velocidades sobre los 600 CPM el indicador experimenta un aumento de entre un 50% y un 100% en el valor pico a pico calculado, en comparación a la curva de base determinada para el estado sano, lo que indica que el daño en el anillo puede ser encontrado.

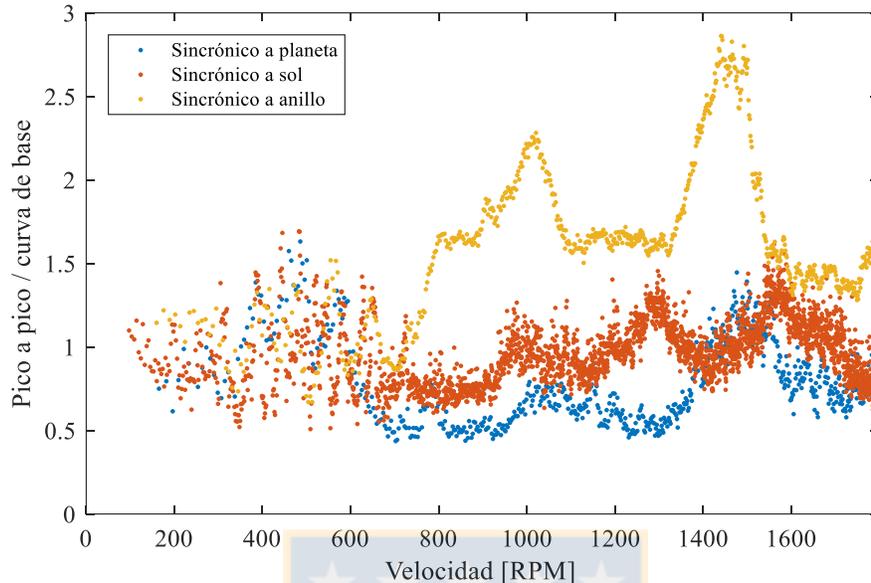


Figura 3.20. Valor pico a pico normalizado, caso daño en anillo, potencia al freno $P_{m\acute{a}x}$.

3.3.6. Discusi3n de resultados

Se concluye que el comportamiento dinámico de una transmisi3n planetaria es complejo, altamente dependiente de la velocidad de operaci3n y no as3 de las variaciones de carga. Sin embargo, el análisis de la velocidad angular instantánea es altamente útil en la detecci3n de daños en la transmisi3n.

Variaciones en la potencia al freno, no generan mayormente un cambio en el comportamiento vibratorio. En tanto, el alcance de zonas resonantes con las primeras frecuencias de engrane al variar la velocidad, dificultan ampliamente la identificaci3n de cualquier falla puesto que se da un aumento de los niveles vibratorios de forma homogénea en el espectro. Esto hace que cualquiera sea la forma en que se promedie la seál, el resultado entregará niveles vibratorios similares, siendo imposible asociar los resultados a un daño. Por otro lado, para bajas velocidades de operaci3n, la presencia de componentes eléctricas provenientes de la alimentaci3n del freno magnético, se superponen a los arm3nicos de la frecuencia de engrane, lo que no permite obtener informaci3n del comportamiento de la transmisi3n. Para el resto de las condiciones de operaci3n, se observa que el cálculo del valor pico a pico de la seál es particularmente útil en la detecci3n de un daño en la transmisi3n planetaria.

Los ensayos muestran que el daño en sol es el más simple de identificar, el valor pico a pico de la seál para una transmisi3n con daño en sol es notoriamente mayor al obtenido de una transmisi3n sana. El espectro de la seál obtenida para una transmisi3n con daño en sol muestra bandas laterales a la frecuencia de falla del sol en torno a la frecuencia de engrane de alta amplitud, lo que permite identificar el daño simplemente a partir de un análisis espectral de la IAS. Esto se encuentra asociado a la ubicaci3n del sistema de medici3n: el encoder utilizado para medir al IAS se encuentra ubicado a la entrada de la transmisi3n, midiendo directamente la velocidad angular del sol. Así mismo, se entiende que lo más

difícil de identificar sea un daño en el anillo, el cuál es el componente más alejado del sol, engranando con los planetas, los que a su vez engranan con el sol.



CAPÍTULO 4

Aplicación en molino de bolas

4.1. Operación y dinámica de molinos

Los molinos rotatorios son ampliamente usados en minería en la conminución de minerales. Estos molinos están compuestos básicamente por un cilindro horizontal en cuyo interior se deposita el material que se desea moler. La rotación del cilindro, denominado tambor, le proporciona la energía cinética y potencial al material, necesaria para la reducción del tamaño. El material es arrastrado por una serie de lifters dispuestos de forma transversal a lo largo del tambor.

En operación, resulta relevante el estudio de la dinámica de la carga al interior del molino. La Figura 4.1 muestra el comportamiento de la carga dentro del molino, el movimiento de la carga se divide en dos partes: la forma de la carga y su trayectoria.

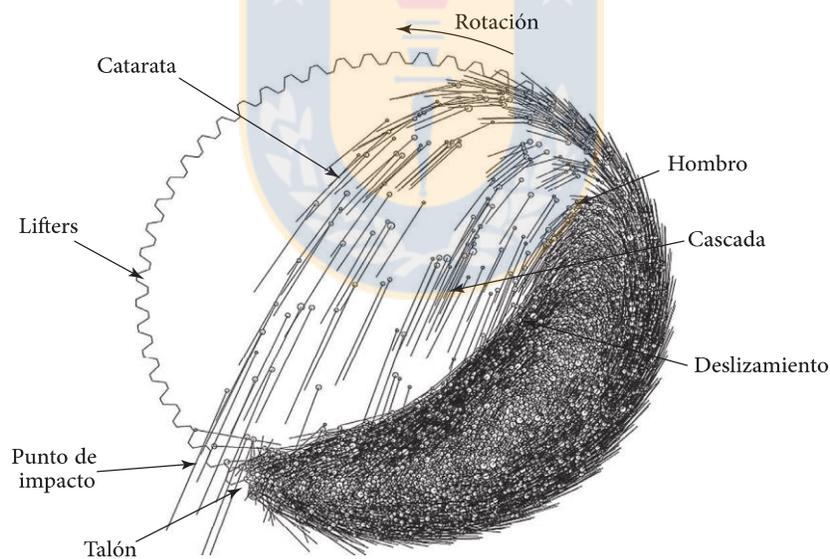


Figura 4.1. Comportamiento de la carga [Wu et al. 2013].

Bajo condiciones normales de operación la carga adquiere una forma similar a un riñón limitado por dos posiciones angulares denominadas talón y hombro de la carga. El talón es la posición donde los lifters comienzan a levantar la carga luego de que ésta cae. El hombro es el punto donde la trayectoria de las

partículas que están siendo levantadas por los lifters comienzan a independizarse del movimiento del tambor.

La trayectoria de la carga hace referencia al movimiento de caída libre que describen las partículas. La posición más elevada donde impacta el material se conoce como punto de impacto, el resto del material impacta desde este punto hacia el centro del molino. A bajas velocidades, las partículas ruedan sobre la carga sin alcanzar caída libre, esto se conoce como deslizamiento; a velocidades muy altas, se creará una gran fuerza centrífuga que evitará que las partículas caigan, esto se conoce como movimiento centrífugo, la velocidad a la que las partículas comienzan a centrifugarse se conoce como velocidad crítica. En condiciones óptimas, la velocidad de rotación es lo suficientemente alta para que la carga experimente un movimiento de caída libre impactando sobre el talón de la carga (movimiento de cascada); al aumentar la velocidad de rotación, el punto de impacto se mueve, impactando las partículas sobre el manto del tambor y sobre los lifters (movimiento de catarata).

Con el fin de caracterizar el comportamiento de las partículas durante la operación del molino, se propone el monitoreo mediante la medición de la velocidad angular instantánea, a fin de identificar el tipo de movimiento de la carga a partir del análisis de la señal.

4.2. Métodos de medición de IAS

El banco de ensayos utilizado para realizar las mediciones corresponde a un molino de prueba instalado en el Laboratorio de Accionamientos del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción, ver Anexo A, sección A.3.

Como sistema de medición empleado para el cálculo de la IAS se utiliza el encoder óptico acoplado al motor eléctrico. El encoder entrega 2048 pulsos por revolución, los tiempos de paso de cada segmento son determinados con un contador con una frecuencia de 80 MHz.

Debido a la lejanía del encoder óptico con respecto al molino, se instala una rueda dentada en el eje del molino como encoder adicional para ser medido con un sensor magnético que genera una señal análoga de forma sinusoidal con un pulso por cada paso de un diente frente al sensor. La resolución de este encoder es de $N = 150$ pulsos por revolución. La señal análoga es medida con una tarjeta ADC con una frecuencia de muestreo de 25.600 Hz.

Con el fin de compensar errores geométricos que pueda tener la rueda dentada, se realiza un ensayo de calibración para determinar la razón de paso de cada segmento de la rueda dentada. Se hace rotar el eje, con el molino desmontado para evitar variaciones sincrónicas, hasta los 1500 CPM del motor. Se miden simultáneamente los tiempos transcurridos con el encoder óptico, y la señal análoga con el sensor magnético. La Figura 4.2 muestra la geometría encontrada con la utilización del método considerando 32 revoluciones para promediar.

La desviación estándar normalizada para la razón de paso calculada es de 0,0105 lo que se considera normal para este tipo de encoder. La razón de paso obtenida será utilizada para corregir la geometría para cada medición.

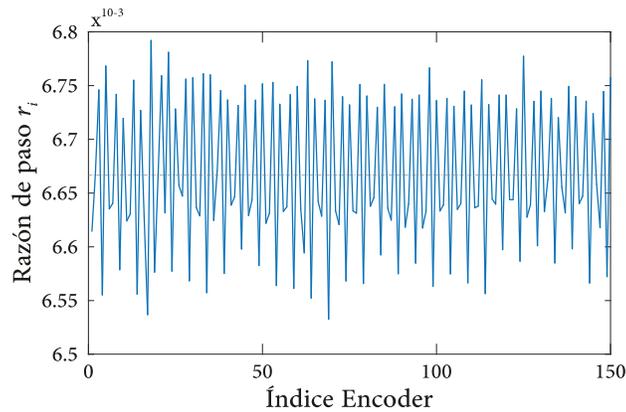


Figura 4.2. Razón de paso de la rueda dentada.

La Figura 4.3 muestra el espectro obtenido a partir de la medición de la IAS sobre la rueda dentada para una condición de llenado de 28% (8% acero, 20% aluminio) y velocidad de rotación 85% la velocidad crítica, la componente 30X correspondiente a la frecuencia de paso de lifter f_{PL} es marcada en el espectro. La Figura 4.3(a) muestra el espectro obtenido calculando la IAS sin compensar, esto es asumiendo que el espaciado angular entre pulsos de encoder se mantiene constante. La Figura 4.3(b) muestra el espectro obtenido calculando la IAS con compensación de errores geométricos utilizando como base la razón de paso encontrada anteriormente. Conforme con lo esperado, para el caso sin compensar, se observan componentes sincrónicas a la velocidad de rotación del molino de gran amplitud producto de los errores geométricos que impiden la identificación de componentes de interés en el espectro. Por otra parte, para la situación compensada, se observa que desaparecen las componentes sincrónicas y se logra identificar con mayor claridad la frecuencia de paso de lifter.

4.3. Evaluación de sistemas de medición

Se estudia la capacidad de diagnóstico de los sistemas de medición empleados. Para ello se realiza un ensayo consistente en una rampa lineal desde 0 a 1800 CPM del motor en 240 s, con un nivel de llenado del molino de 34%, 14% de acero y 20% de aluminio. Se mide simultáneamente la IAS con el encoder óptico y con el sensor magnético. El post-procesamiento corresponde a la aplicación de una transformada ángulo-frecuencia (Short Angle Fourier Transform, SAFT).

La Figura 4.4 muestra los resultados obtenidos, sobre la figura se marcan los límites donde se observó transición entre los tipos de movimiento de cascada a catarata y catarata a centrífugo. La Figura 4.4(a) muestra la SAFT aplicada a la señal del encoder óptico, se observa una zona resonante a aproximadamente 3,2 Hz y a velocidades sobre la velocidad crítica, se observa la aparición de una componente 1X. No se observan mayores diferencias entre las distintas zonas. La Figura 4.4(b) muestra la SAFT aplicada a la señal del sensor magnético, es posible observar al menos 4 zonas resonantes a aproximadamente 3,2 Hz, 7,8 Hz, 21,3 Hz y 42,1 Hz. A velocidades sobre la velocidad crítica se observa la 1X de amplitud predominante. Aproximadamente al alcanzar un 80% de la velocidad crítica y hasta

llegar al 105%, se distingue una componente 30X correspondiente a la frecuencia de paso de lifter f_{PL} . Es interesante observar que en la zona movimiento de catarata, el espectro adquiere una contribución de ruido a alto orden de gran amplitud, lo que no sucede en zonas de movimiento de cascada y centrífugo.

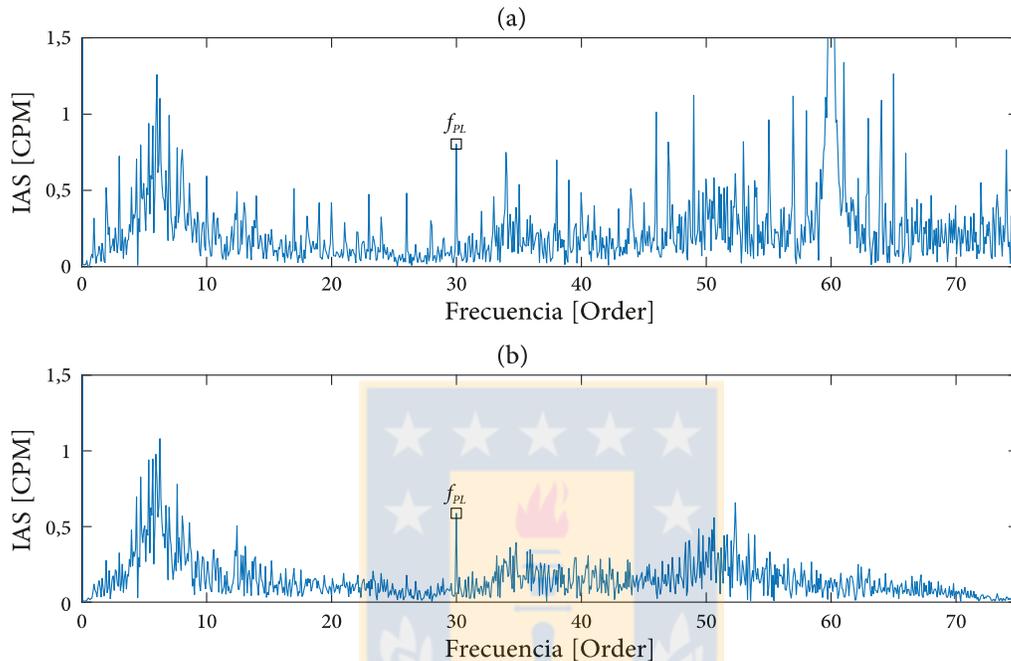


Figura 4.3. Espectro de la señal de IAS medida, 28% nivel de llenado, 8% acero, 20% aluminio; 85% velocidad crítica: (a) sin compensación de errores geométricos y (b) con compensación de errores geométricos.

La Figura 4.5 muestra el espectro obtenido para tres distintas velocidades de operación que abarcan las zonas de cascada, catarata y centrífugo respectivamente, extraídos de la SAFT para un análisis del contenido espectral en más detalle. En la zona de catarata se observa la frecuencia de paso de lifter y ruido a alta frecuencia asociado a los impactos del material sobre el manto del tambor y lifters. Se observa una mayor sensibilidad cuando las partículas impactan sobre el manto, que cuando lo hacen sobre la misma carga. Cuando se obtiene movimiento centrífugo, desaparece la frecuencia de paso de lifter y el ruido a alta frecuencia ya que disminuye casi totalmente la cantidad de material que adquiere la trayectoria de caída libre. En su lugar, se observa una predominancia de componente a la 1X y 2X, esto asociado a desbalance en el molino producto de una distribución no perfectamente homogénea del material alrededor de todo el cilindro.

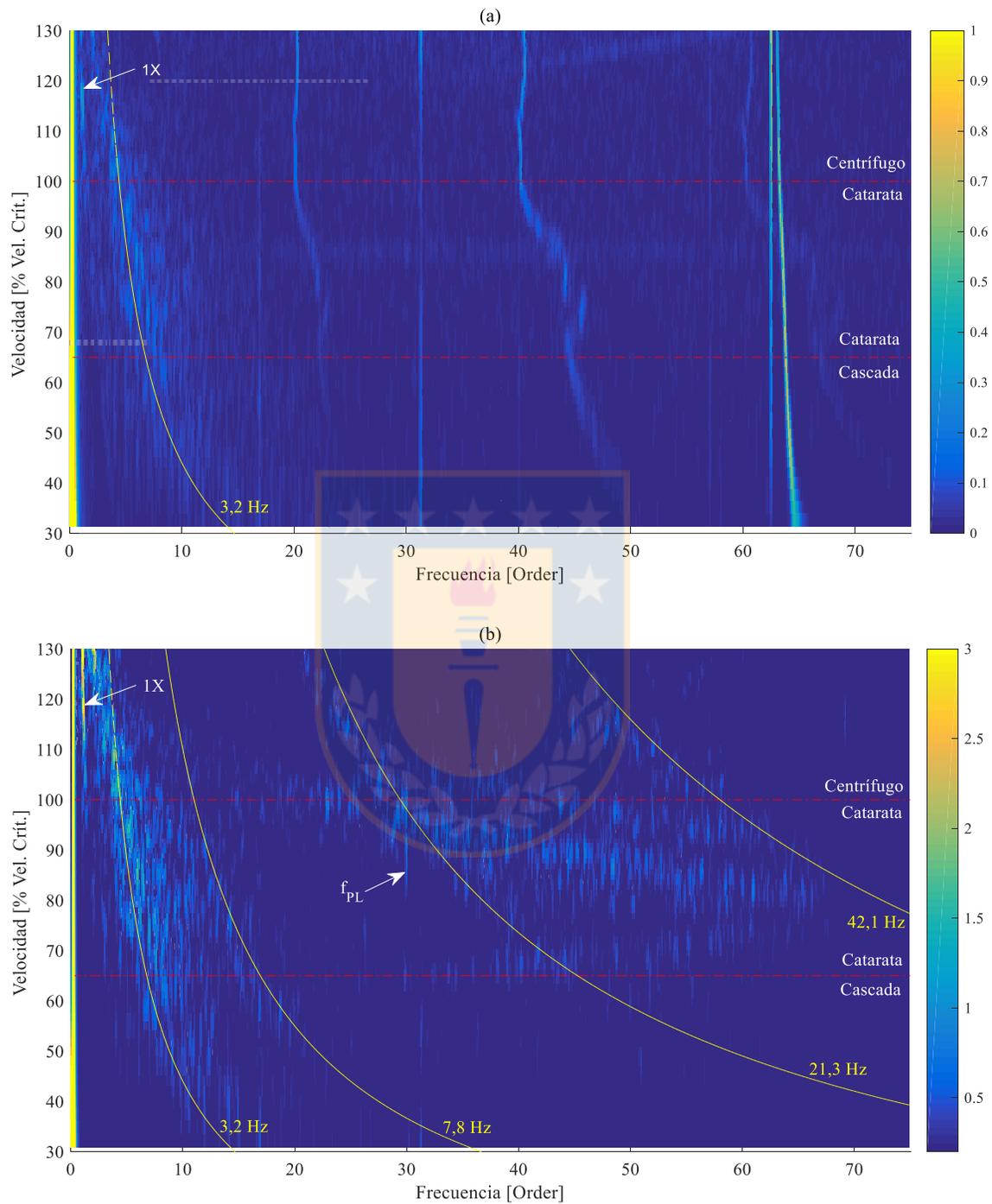


Figura 4.4. SAFT durante la partida del molino. 34% nivel de llenado, 14% acero, 20% aluminio: (a) encoder óptico y (b) sensor magnético.

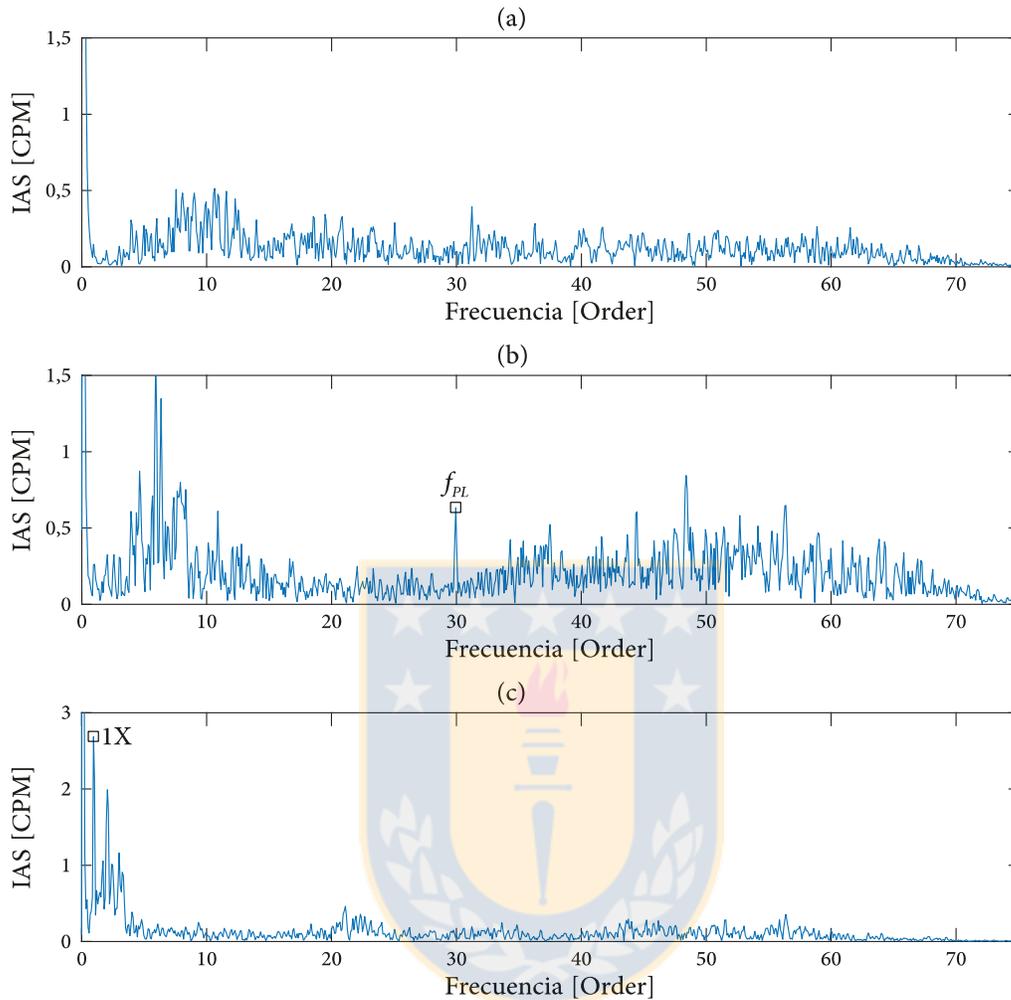


Figura 4.5. Espectro de IAS obtenido a partir del sensor magnético, 34% nivel de llenado, 14% acero, 20% aluminio: (a) 50% velocidad crítica, (b) 85% velocidad crítica y (c) 125% velocidad crítica.

El peso de la masa desbalanceada ejerce un torque variable que dependiendo de su posición angular, puede estar a favor del movimiento o en contra. Del diagrama de la Figura 4.6, es posible obtener la función que describe el torque que produce el peso de la masa desbalanceada sobre el cilindro:

$$T = -mg r \cos(\Omega t), \quad (16)$$

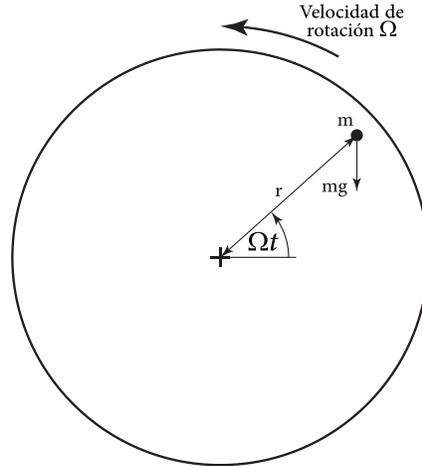


Figura 4.6. Diagrama de una masa desbalanceada en un disco que rota a velocidad constante.

De esta forma, la masa desbalanceada produce un torque con variación sinusoidal a la velocidad de rotación del molino, lo que provoca variaciones en la velocidad angular con frecuencia fundamental igual a la frecuencia de rotación del molino.

4.4. Distintas condiciones de operación

Se ensayan 6 distintos niveles de llenado de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Niveles de llenado ensayados.

Prueba	Nivel acero [%]	Nivel aluminio [%]	Nivel total [%]
Carga 1	8	20	28
Carga 2	10	20	30
Carga 3	12	20	32
Carga 4	14	20	34
Carga 5	10	22	32
Carga 6	12	22	34

Para cada nivel de llenado se miden distintas velocidades de operación, variando desde 50% de la velocidad crítica hasta 135% de la velocidad crítica.

La Figura 4.7 muestra una comparación de distintos parámetros analizados para cada condición de operación. La Figura 4.7(a) muestra la evolución de la amplitud de la componente a la frecuencia de paso de lifter, se observa un comportamiento similar para los distintos niveles de carga ensayados, la componente se distingue cuando se alcanza un 80% de la velocidad crítica y desaparece cuando se sobrepasa la velocidad crítica lo que coincide con el punto donde las partículas se empiezan a centrifugar.

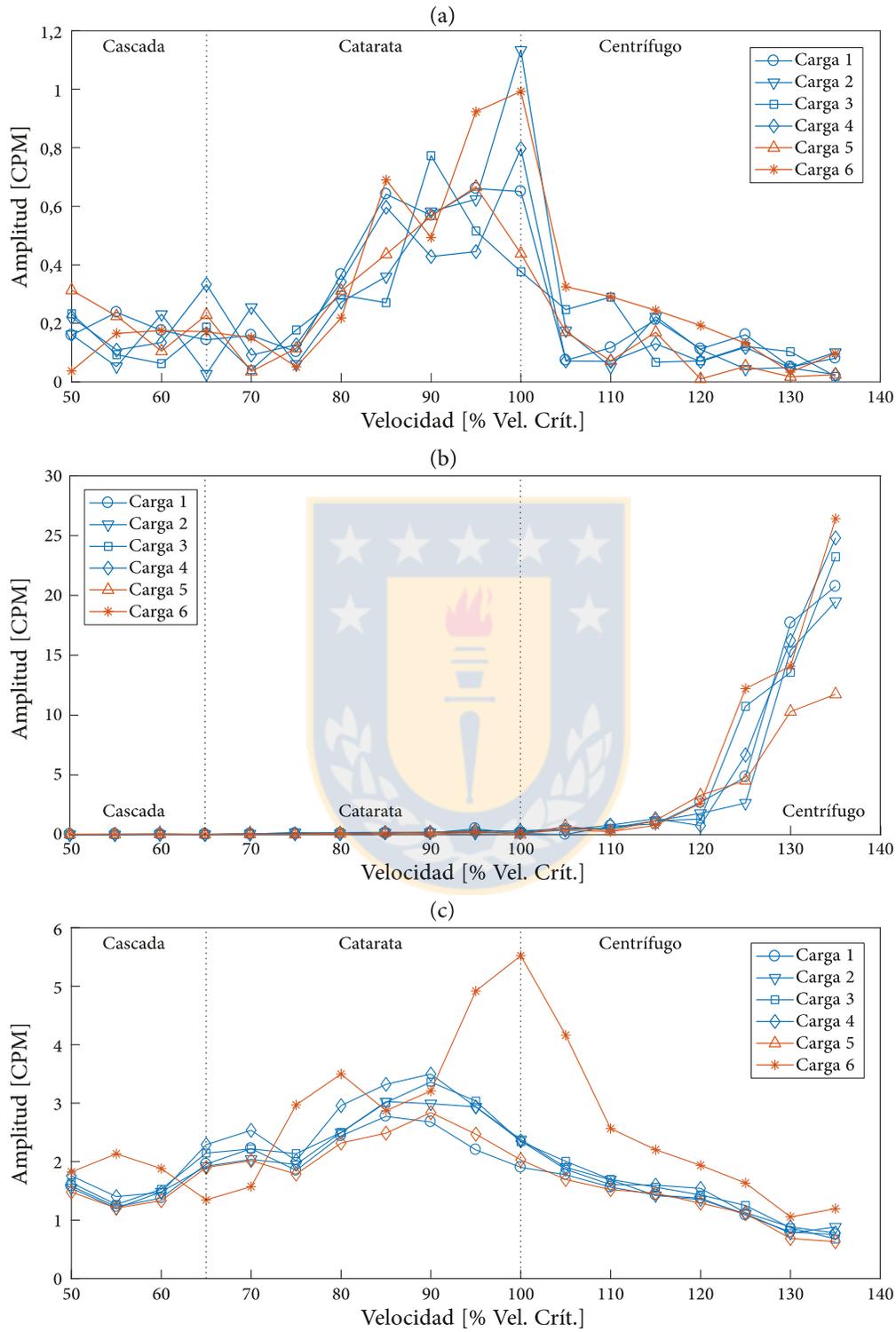


Figura 4.7. (a) Amplitud de f_{PL} , (b) amplitud de la 1X y (c) valor RMS a alta frecuencia (>30 Order).

La Figura 4.7(b) muestra la evolución de la amplitud de la componente 1X, se observa una aparición de la componente a partir del 115% de la velocidad crítica, experimentando desde ese punto un aumento brusco, se observa que a medida que aumenta el volumen de carga, es mayor la amplitud de la componente.

La Figura 4.7(c) muestra el valor RMS de la señal contribuido por las componentes a alta frecuencia (>30 Order). De la Figura 4.4(b), se observaba que el movimiento de catarata tenía una alta contribución de ruido a alta frecuencia, lo que se ve reflejado en la Figura 4.7(c), en el punto de transición de cascada a catarata existe un aumento del valor RMS el cual disminuye a partir de la transición de catarata a centrífugo.

4.5. Ensayo sin un lifter

Con el fin de analizar el comportamiento en presencia de daño, se realizan ensayos quitándole un lifter al molino. Se comparan los espectros para un mismo nivel de llenado para las velocidades: 70%, 80% y 135% de la velocidad crítica. Cada ensayo es realizado con una duración de 240 s.

La Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos a una velocidad de 70% la velocidad crítica. Se observa que para el caso con un lifter menos, se distinguen componentes armónicas de la velocidad de rotación, y en particular la frecuencia paso de lifter aumenta en amplitud, esto asociado al lifter ausente que no levanta la carga a cada revolución.

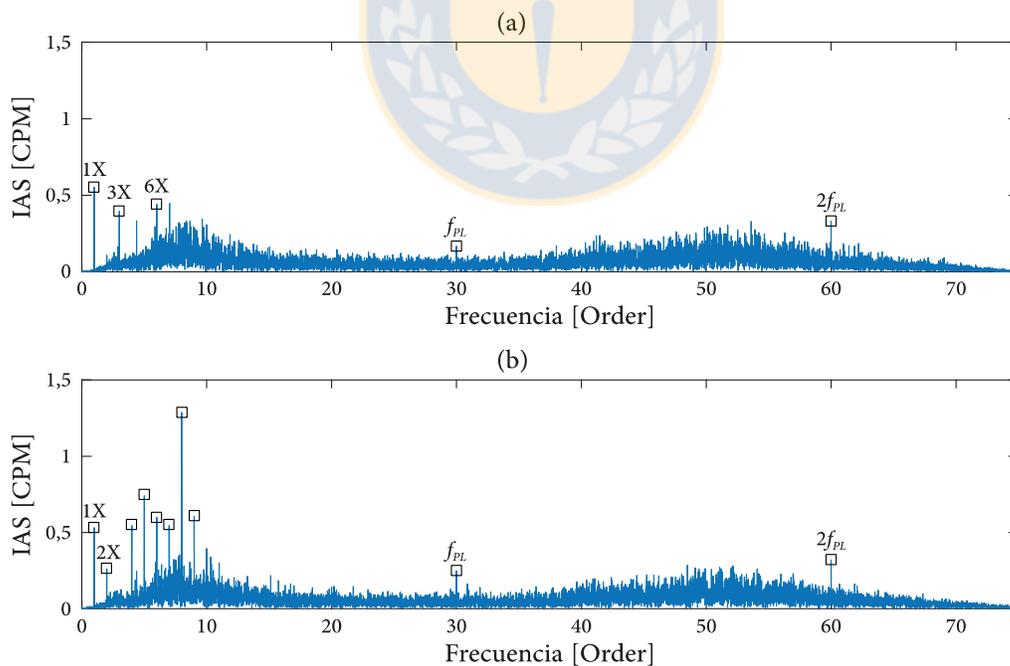


Figura 4.8. Espectro de IAS, 70% velocidad crítica. (a) Todos los lifters, (b) un lifter menos.

La Figura 4.9 muestra los resultados obtenidos a una velocidad de 80% la velocidad crítica. Para ambos casos el espectro es bastante similar, los impactos producto de la caída en cascada son elevados, lo que se refleja en una alta amplitud de la componente a la frecuencia de paso de lifter. Se observan indicios de carga centrifugada, asociada a una elevada amplitud 1X. Para el caso de un lifter menos, se distinguen ciertos armónicos a la velocidad de rotación que para el otro caso no aparecen. Es posible distinguir además, bandas laterales a la frecuencia de rotación del molino en torno a la frecuencia de paso de lifter, esto como consecuencia de la modulación que se produce una vez por revolución, asociado a la carga que deja de arrastrar el lifter ausente.

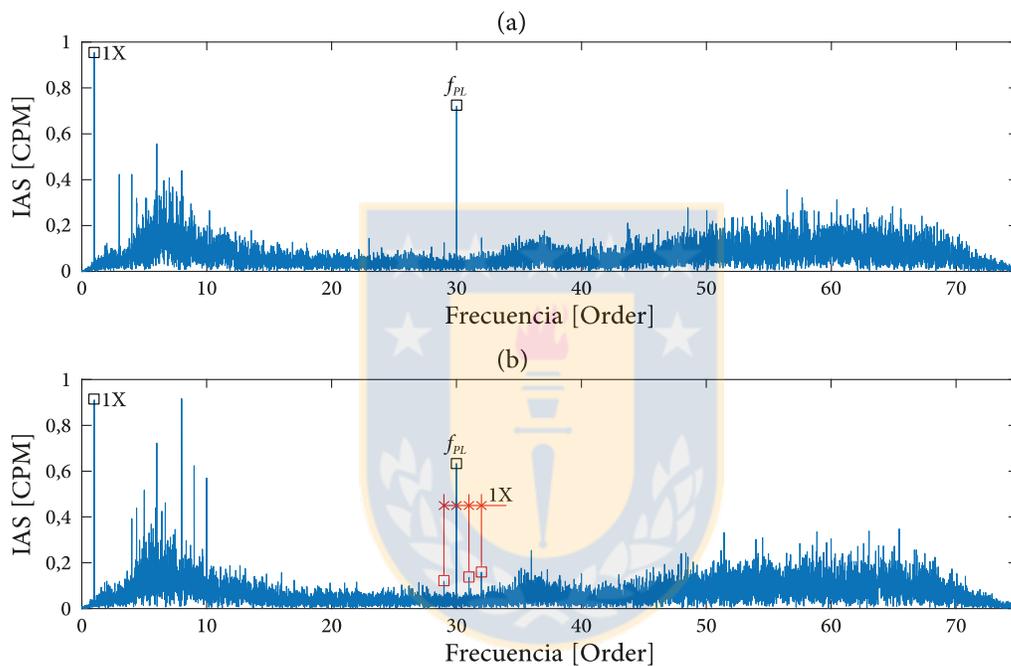


Figura 4.9. Espectro de IAS, 80% velocidad crítica. (a) Todos los lifters, (b) un lifter menos.

La Figura 4.10 muestra los resultados obtenidos a una velocidad de 135% la velocidad crítica. A esta velocidad la carga se encuentra prácticamente toda centrifugada, lo que se refleja en un espectro con amplitud 1X predominante de gran amplitud para ambos casos. Para el caso de un lifter menos, la ausencia del lifter puede originar que la carga que se acumule sobre ese sector produzca un mayor desbalance lo que se ve reflejado en que la amplitud de la componente 1X para el caso de 1 lifter menos sea mayor que para el caso normal.

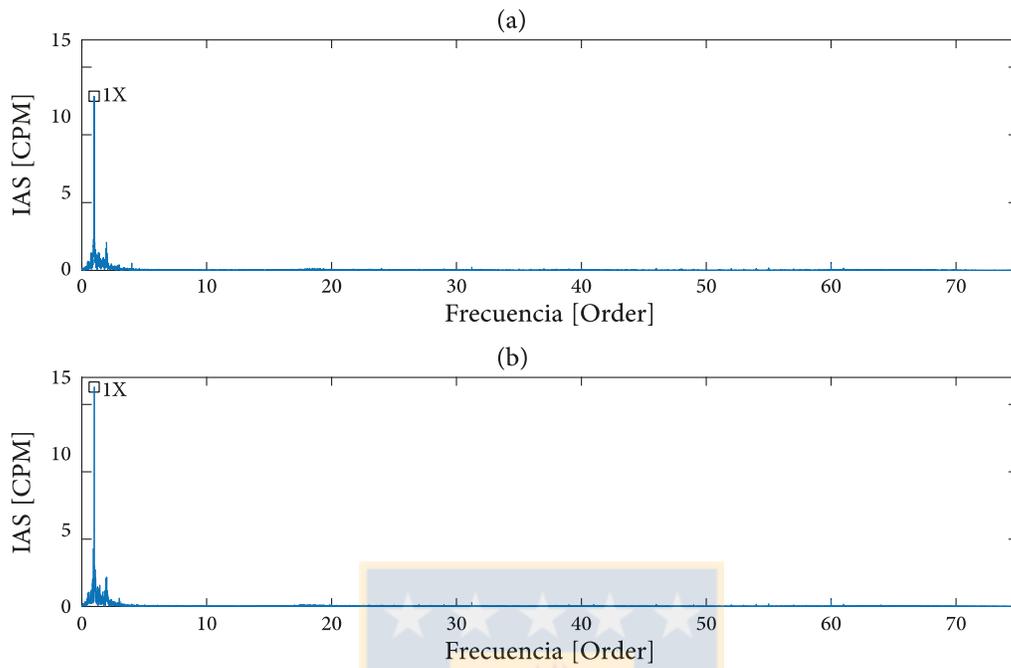


Figura 4.10. Espectro de IAS, 135% velocidad crítica. (a) Todos los lifters, (b) un lifter menos.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y perspectivas

5.1. Conclusiones

La limitada resolución de encoder a base de ruedas dentadas implica tener una potencial fuente de aliasing al momento de analizar la IAS. Por otro lado, errores geométricos normales en la fabricación de cualquier rueda, traen como consecuencia un muestreo de la IAS con una tasa variable, la que se repite una vez por revolución, afectando de manera significativa el espectro mediante la aparición de componentes sincrónicas de gran amplitud que se confunden con las componentes reales que describen el comportamiento dinámico de la máquina. La aplicación de los métodos propuestos para la minimización de los errores de aliasing y errores geométricos mostraron que es posible lograr una considerable disminución del error en el análisis, reflejado en cambios en el espectro validados tanto por ensayos numéricos como experimentales.

Se analiza la velocidad angular instantánea como técnica de monitoreo de condición en transmisiones planetarias y en un molino de bolas.

De los ensayos experimentales hechos en la transmisión planetaria, se observa que a partir de un análisis espectral de los ensayos a velocidad de operación constante, no se distingue una variación significativa para las distintas condiciones de carga. Los ensayos en estado sano, daño en planeta y daño en anillo son similares entre sí. En tanto, para el caso de falla en sol, se distinguen bandas laterales a la frecuencia de falla del sol f_{fS} en torno a f_g , lo que indica que un daño en el sol es fácilmente distinguible a partir de un análisis del espectro. Para condiciones de carga constante, el contenido espectral es altamente dependiente de la velocidad de operación. Componentes eléctricas con frecuencia constante en el dominio temporal alcanzan altos valores de orden para velocidades bajas del motor, lo que impide distinguir componentes asociadas al proceso de engrane. Zonas resonantes, por otro lado, contribuyen altamente cuando coinciden con los primeros armónicos de la frecuencia de engrane.

Con el fin de detectar un daño e identificar el componente dañado, el cálculo del promedio sincrónico a la frecuencia de falla del componente de interés es de gran utilidad ya que permite aislar las principales componentes asociadas a la falla. Se prueban distintos indicadores para la detección de falla y se evalúan según la magnitud de la diferencia entre lo obtenido para el caso con falla y el estado sano. El cálculo del valor pico a pico sobre la señal residual de los promedios sincrónicos entrega los mejores resultados, permitiendo identificar la falla de manera relativamente simple para todos los ensayos realizados.

De los ensayos experimentales hechos en el molino de bolas, se observa que a partir de las mediciones obtenidas con el encoder óptico no se logra distinguir mayor información. En tanto, las mediciones obtenidas con el sensor magnético, entregan información útil: se observan distintas zonas resonantes; se observa la componente 1X de amplitud predominante para velocidades sobre la velocidad crítica;

aproximadamente al alcanzar un 80% de la velocidad crítica y hasta llegar al 105% se distingue una componente 30X correspondiente a la frecuencia de paso de lifter f_{PL} , y por otro lado, se observa que en la zona de movimiento de catarata, el espectro adquiere una contribución de ruido a alta frecuencia de gran amplitud, lo que no sucede en zonas de movimiento de cascada y centrífugo.

Lo anterior constituye una interesante herramienta para estimar parámetros relacionados con la forma del movimiento de la carga y la trayectoria de las partículas dentro del molino a través del análisis de la IAS. Es posible reconocer el movimiento centrífugo por la aparición de una componente 1X de amplitud predominante, asociado al desbalance por la carga anillada; la contribución del ruido a alta frecuencia, es una característica que es posible asociar con el movimiento de catarata; en tanto, el movimiento de cascada se caracteriza por no poseer los rasgos mencionados anteriormente.

Del análisis del ensayo sin un lifter, se observa que cuando se analiza en el rango de velocidades donde la frecuencia de paso de lifter aparece, se observa una banda lateral a la velocidad de rotación del molino en torno a la frecuencia de paso de lifter la que no existe en los ensayos con todos los lifter en posición.

5.2. Perspectivas

Los ensayos realizados en la transmisión planetaria fueron hechos sin modificar el nivel de daño inducido sobre cada componente, por lo que los resultados sólo permiten concluir si existe o no daño. Se propone el estudio del comportamiento de los indicadores para distintos niveles de daño, a modo de establecer una relación entre ellos y estimar a través del análisis de la IAS la magnitud del daño.

Por otra parte, los ensayos realizados en el molino de bolas fueron trabajados para una geometría fija de lifter, por lo que los resultados son específicos. Se propone el análisis del comportamiento para distintas geometrías de lifter y evaluar cómo influye en el comportamiento espectral.

REFERENCIAS

- André H., Girardin F., Bourdon A., Antoni J., Rémond D. (2014).
Precision of the IAS monitoring system based on the elapsed time method in the spectral domain.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.44, 14-30.
- Canto A. (2017).
Identificación y compensación de errores en la medición de la velocidad angular instantánea para el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias.
Memoria de título, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.
- Coats M.D., Randall R. (2014).
Single and multi-stage phase demodulation based order-tracking.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.44, 86-117.
- Diamond D.H., Heyns P.S., Oberholster A.J. (2016).
Online shaft encoder geometry compensation for arbitrary shaft speed profiles using Bayesian regression.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.81, 402-418.
- Janssens K., Van Vlieberghe, P., Claes W., Peeters B., Martens T., D'Hondt P. (2010).
Zebra tape butt joint detection and correction algorithm for rotating shaft with torsional vibrations.
Proceedings of the ISMA2010, 2869-2882.
- Lebold M., McClintic K., Campbell R., Byington C., Maynard K. (2000).
Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics.
Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. May 1-4, 623-634.
- Leclère Q., Girardin F., Rémond D. (2013)
An analysis of instantaneous angular speed measurement errors.
International Conference Surveillance. Vol.7, 1–11.
- Li Y., Gu F., Harris G., Ball A., Bennett N., Travis K. (2005).
The measurement of instantaneous angular speed.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.19, 786-805.
- Morales I. (2018)
Evaluación experimental de distintas técnicas para el diagnóstico de fallas en transmisiones planetarias.
Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.

- Maleki-Moghaddam M., Yahyaei M., Banisi S. (2013).
A method to predict shape and trajectory of charge in industrial mills.
Minerals Engineering. Vol.46–47,157–166.
- Morrell S. (1993).
The prediction of power draw in wet tumbling mills.
Doctorate Thesis, University of Queensland, Australia.
- Powell M. (1991)
The effect of liner design on the motion of the outer grinding elements in a rotary mill.
International Journal of Mineral Processing, Vol.31, 163-193.
- Rémond D. (1998).
Practical performances of high-speed measurement of gear transmission error or torsional vibrations with optical encoders.
Measurement Science Technology. Vol.9, 347–353.
- Renaudin L., Bonnardot F., Musy O., Doray J.B., Rémond D. (2010).
Natural roller bearing fault detection by angular measurement of true instantaneous angular speed.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.24, 1998-2011.
- Resor B.R., Trethewey M.W. Maynard K.P. (2005).
Compensation for encoder geometry and shaft speed variation in time interval torsional vibration measurement.
Journal of Sound and Vibration. Vol.286, 897-920.
- Rivola A., Troncossi M. (2014).
Zebra tape identification for the instantaneous angular speed computation and angular resampling of motorbike valve train measurements.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.44, 5-13.
- Salas M. (2014).
Simulación numérica del comportamiento dinámico en torsión de un cigüeñal.
Memoria de título, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción.
- Saavedra, P.N., González, J.A. (2005).
New revolution-order transform for analysing non-stationary vibrations.
OR Insight, Vol.47, 29-35.
- Saavedra P.N., Rodriguez C.G. (2006).
Accurate assesment of computed order tracking.
Scock and Vibration. Vol.13, 13-32.

Stander C.J., Heyns P.S. (2005).

Instantaneous angular speed monitoring of gearboxes under non-cyclic stationary load conditions.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.19, 817-835.

Wu, M., Wang, V. (2013).

Modeling ball impact on the wet mill liners and its application in predicting mill magnetic liner performance.
Mineals. Engineering. Vol.61, 126-132.

Yang J., Pu L., Wang Z., Zhou Y., Yan X. (2001).

Fault detection in a diesel engine by analyzing the instantaneous angular speed.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.15 (3), 549-564.

Yu S., Zhang X. (2010).

A data processing method for determining instantaneous angular speed and acceleration of crankshaft in an aircraft engine-propeller system using a magnetic encoder.
Mechanical Systems and Signal Processing. Vol.24, 1032-1048.



ANEXO A

Presentación de bancos de ensayos

A.1. Rotor-Kit

El banco de ensayos utilizado para realizar ensayos experimentales de compensación de geometría corresponde a un Rotor-Kit de la marca Bently Nevada ubicado en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción. La Figura A.1 muestra un esquema del banco de ensayos utilizado. El banco se compone de un motor eléctrico de marca Bently Nevada de 0,1 HP de potencia, acoplado a un eje consistente en un rotor de Jeffcott, en el extremo opuesto al motor eléctrico se encuentra un encoder óptico acoplado.

Como dispositivos de medición se tienen una rueda dentada a la salida del motor, la que es muestreada por un sensor de desplazamiento, marca Bently Nevada, modelo 3300 XL, que entrega un pulso eléctrico análogo representativo de la distancia entre la punta del sensor y la rueda dentada. La rueda dentada se compone de 12 dientes rectos con perfil cuadrado y diámetro externo de 30 [mm]. Adicionalmente, se puede medir la velocidad angular con el encoder óptico de tipo incremental. El encoder óptico es de la marca Baumer, posee 2 canales de medición de 2048 pulsos desfasados entre sí en 90° y un tercer canal de referencia con un pulso por revolución.

El sistema de adquisición de datos consiste en un chasis NI cDAQ-9178 con dos tarjetas de adquisición de datos. La señal análoga entregada por el sensor de desplazamiento es muestreada con una tarjeta NI 9215 con una tasa de 51200 Hz. En tanto para el encoder óptico, los pulsos TTL son adquiridos con una tarjeta NI 9411 y los tiempos transcurridos entre pulsos son entregados por un contador de 80 MHz proporcionado por el chasis.

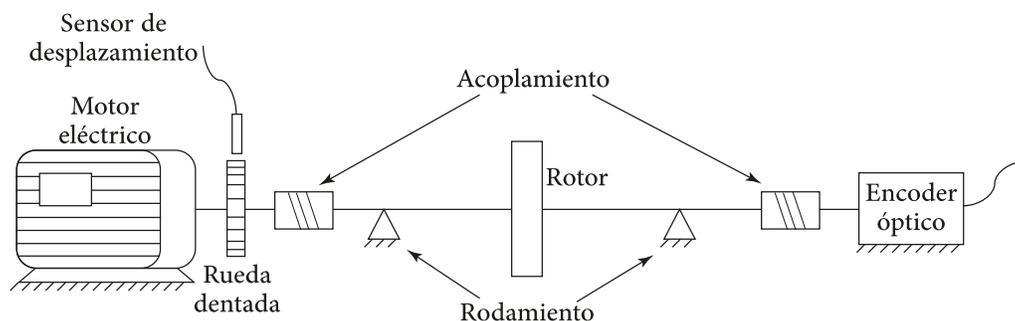


Figura A.1. Esquema de la instalación, Rotor-Kit.

A.2. Transmisión planetaria

El banco de ensayos utilizado para realizar las mediciones corresponde a un banco de transmisión planetaria instalado en el Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Universidad de Concepción. La Figura A.2 muestra un esquema del banco de ensayos utilizado. El banco se compone de un motor eléctrico de la marca Nord y modelo 100LA/4, con un encoder óptico de tipo incremental instalado como parte del sistema de control, un freno magnético encargado de entregar el torque resistente en el sistema y una transmisión planetaria de una etapa y dientes rectos, acoplada con acoplamientos de goma de tipo Jaw, ubicada entre el motor y el freno, la cual es el objeto de estudio. La Figura A.3 muestra una foto real del banco de ensayos.

Como sistema de medición para registrar la IAS se utiliza el encoder óptico del motor y se instala un encoder óptico incremental de eje hueco en el eje del lado sol. El encoder óptico del motor es de la marca Nord, posee 2 canales de medición de 2048 pulsos desfasados entre sí en 90° y un tercer canal de referencia con un pulso por revolución. En tanto, el encoder óptico instalado a la entrada de la transmisión posee 2 canales de medición de 5000 pulsos desfasados entre sí en 90° y un tercer canal de referencia con un pulso por revolución

La transmisión planetaria consta de un anillo fijo, la entrada de torque es por el lado del sol y la salida se realiza por el carrier. Los engranajes de la transmisión tienen módulo 1,5. El número de dientes del sol, Z_s es 18; posee un número de planetas $n_p = 3$, cada uno con un número de dientes $Z_p = 26$ y el anillo tiene un número de dientes $Z_r = 72$. Con esta configuración se tiene una relación de transmisión $f_s/f_c = 5$.

El sistema de adquisición de datos consiste en un chasis NI cDAQ-9178 con una tarjeta de adquisición de datos. Los pulsos TTL, que se obtienen de ambos encoder óptico, son adquiridos con una tarjeta NI 9411 y los tiempos transcurridos entre pulsos son entregados por un contador de 80 MHz proporcionado por el chasis.

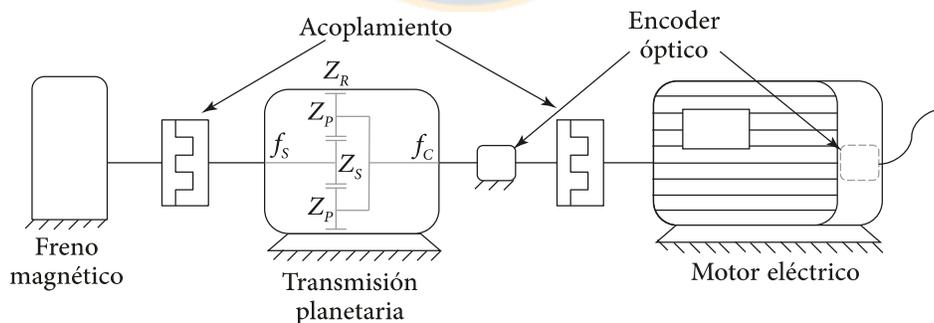


Figura A.2. Esquema de la instalación, transmisión planetaria.

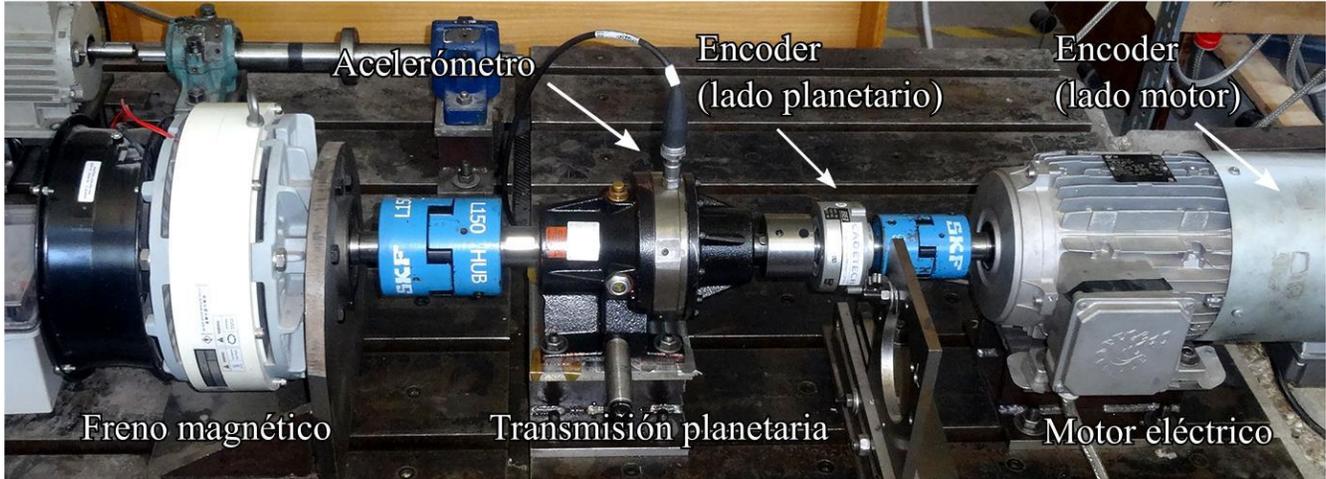


Figura A.3. Foto del banco real.

A fin de obtener ensayos que reflejen el comportamiento de una transmisión planetaria con daño, se aplican fallas localizadas sobre cada uno de los componentes. Los daños son inducidos manualmente mediante desgaste mecánico. Para el caso del sol y el planeta, se desgasta uno de los flancos, en particular al planeta se le desgasta el flanco que engrana con el sol, para el caso del anillo, se desgastan dos flancos consecutivos. La Figura A.4 muestra el daño inducido en cada uno de los componentes. La transmisión admite intercambiar cada componente por separado, lo que permite ensayar distintas configuraciones.

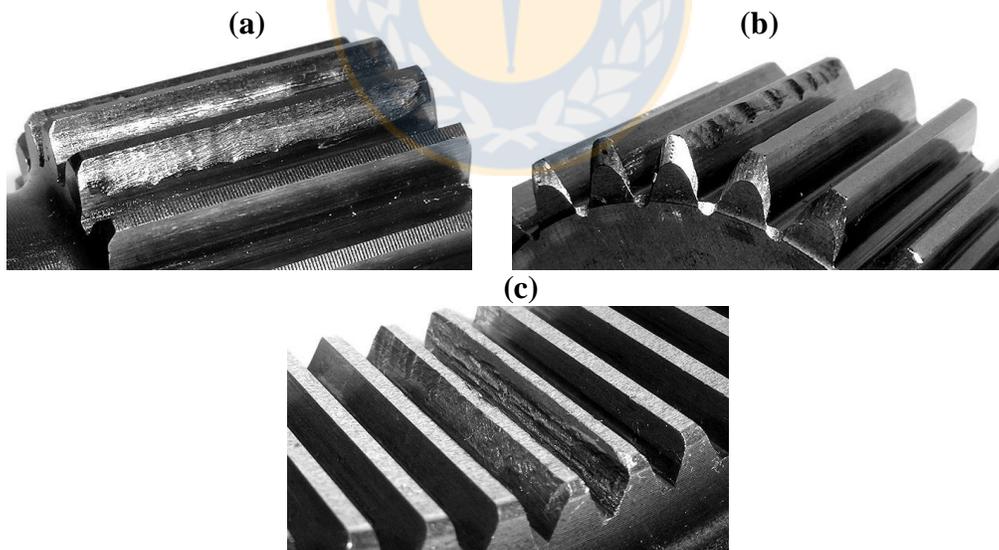


Figura A.4. Daño local inducido en transmisión planetaria: (a) daño en sol, (b) daño en planeta y (c) daño en anillo.

A.3. Molino de bolas

El banco de ensayos utilizado para realizar las mediciones corresponde a uno de los dos molinos que se encuentran en el Laboratorio de Accionamientos del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción. La Figura A.5 muestra un esquema del banco de ensayos utilizado. El banco se compone de un motor eléctrico de la marca Nord tipo SK100L/4 F IG21 con un variador de frecuencia Parker modelo 690-43195B0, con un encoder óptico de tipo incremental instalado como parte del sistema de control; un reductor Bonfiglioli, modelo C41 3P31.2 HS50, cuya relación de transmisión según fabricante es de 31,22945:1. El reductor consta de tres etapas de reducción y engranajes helicoidales. Acoplamientos flexibles Vulkan Flexomax G se utilizan para transmitir el movimiento entre el motor y la entrada del reductor y entre la salida del reductor y el eje de entrada del molino. Finalmente, a la salida del reductor se ubica la base del molino, la cual va apoyada sobre dos descansos, sobre la base se acopla el molino. La Figura A.6 muestra una foto real del banco de ensayos.

Como sistema de medición para registrar la IAS se utiliza el encoder óptico del motor y se instala una rueda dentada sobre la base del molino, la cual es muestreada con un sensor magnético Red Lion, modelo MP-37CA, apuntando sobre los dientes de la rueda. La rueda dentada se compone de 150 dientes rectos con perfil de evolvente y módulo 2. Adicionalmente, se puede medir la velocidad angular con el encoder óptico de tipo incremental. El encoder óptico es de la marca Nord, posee 2 canales de medición de 2048 pulsos desfasados entre sí en 90° , y un tercer canal de referencia con un pulso por revolución.

El molino de bolas instalado corresponde a un molino a escala, corto axialmente, el cual permite estudiar una sección de un molino real. El molino está compuesto por una placa de acero que va acoplada a la base, un cilindro o anillo de technyl y una placa de acrílico transparente que permite observar el movimiento de las partículas dentro del molino. Sobre el anillo se disponen los lifters que son los que permiten levantar la carga. Es posible instalar hasta 30 lifters ubicados cada 12° , con esta configuración se obtiene una frecuencia de paso de lifter f_{pl} de 30 [order].

Al igual que para el Rotor-Kit, el sistema de adquisición de datos consiste en un chasis NI cDAQ-9178 con dos tarjetas de adquisición de datos. La señal análoga entregada por el sensor magnético es muestreada con una tarjeta NI 9215 con una tasa de 51200 Hz. En tanto para el encoder óptico, los pulsos TTL son proporcionados por una tarjeta NI 9411 y los tiempos transcurridos entre pulsos son entregados por un contador de 80 MHz proporcionado por el chasis.

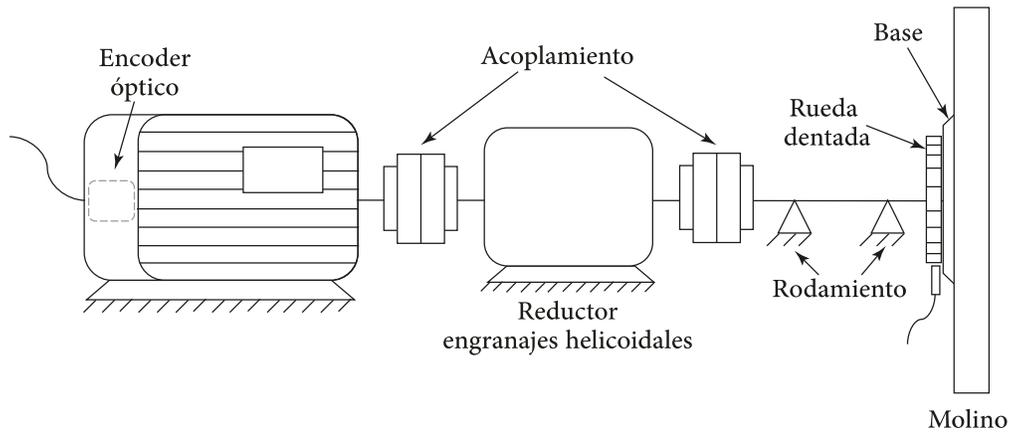


Figura A.5. Esquema de la instalación, molino de bolas.



Figura A.6. Foto del banco real.