

TORQUE Y CONSUMO DE POTENCIA EN MOLINOS AZUCAREROS DE CUATRO MAZAS

JULIUSZ LEWINSKI¹, PAULO GRASSMANN² y TOMAS KALLIN³

¹*Bosch Rexroth, Suecia:* jlewin@prodigy.net.mx

²*Bosch Rexroth, Brasil:* Paulo.Grassmann@boschrexroth.com.br

³*Bosch Rexroth, Suecia:* Tomas.Kallin@boschrexroth.se

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de las mediciones de torques y potencias consumidas en los molinos de cuatro mazas en dos distintos ingenios a lo largo de las últimas cuatro temporadas. Los molinos eran propulsados por accionamientos electro hidráulicos independientes y directos de velocidad variable, lo que permitía medir el torque en cada maza, el cambio en la velocidad entre las mazas superior e inferiores y la automatización de la operación del molino, manteniendo el torque óptimo durante la operación. Adicionalmente, se analizaron las relaciones entre el torque, el nivel del chute y la flotación de la maza superior. La automatización de la operación del molino permitió su operación estable con el torque óptimo, generando excelentes resultados operativos. La conclusión principal es que no obstante la velocidad de la maza superior o la relación entre las velocidades de la maza superior y mazas inferiores en el rango de velocidades que se usan con frecuencia en los molinos de cuatro mazas, el torque en la maza superior y el consumo de potencia en la maza superior siempre se acercan al 50% del torque total y de la potencia total. Los valores absolutos del torque confirmaron los resultados de las ecuaciones teóricas y empíricas.

PALABRAS CLAVES: Hidráulica, Molino, Accionamiento, Independiente, Torque, Velocidad.

INTRODUCCIÓN

El accionamiento individual electro hidráulico del molino, que consiste en accionar cada maza del molino de manera independiente por medio de motores hidráulicos ubicados directamente sobre los ejes de las mazas del molino, permite la automatización de la operación del molino y la medición de los torques de cada maza. Otra ventaja importante de los accionamientos individuales es la posibilidad de operar los molinos con distinta velocidad en cada maza, a fin de mejorar el proceso de extracción dentro del molino y el trabajo de los mismos accionamientos Lewinski et al. (2010). La mayor velocidad de la maza cañera logra una mejor alimentación del molino, incrementando por tanto la capacidad de molienda, y esta ventaja es la principal razón de instalar los accionamientos asistidos a las mazas cañeras en muchos ingenios Lewinski (2005). La velocidad de la maza inferior bagacera permite una reducción en la reabsorción del jugo por el bagazo. Cuando el molino es accionado por la maza superior y las coronas como en el caso de los accionamientos convencionales o los así llamados accionamientos de maza superior, el torque sobre la maza cañera siempre es menor que en la maza bagacera. El accionamiento asistido, cuyo objetivo es aumentar la capacidad de molienda y la potencia instalada y/o reducir la carga sobre la transmisión existente, siempre se debe colocar primero sobre la maza cañera, aplicando así una velocidad más alta sobre la maza cañera con respecto a la maza superior. La medición constante de la presión en los sistemas hidráulicos de los accionamientos y de la velocidad en los motores hidráulicos y la muy baja inercia del motor hidráulico, reducida en el eje del molino (décimas y hasta centésimas de veces menor que en los accionamientos de los molinos de engranajes de velocidad variable) permite la automatización de la operación del molino para mantener el torque óptimo en el interior del molino, dando como resultado el mejor rendimiento de los molinos Wesche et al. (2011). Otra ventaja importante de los accionamientos electro hidráulicos, debido a su principio de trabajo, es la posibilidad de mantener el torque

máximo de la velocidad cero a la velocidad máxima, sin restricciones de tiempo. Esto permite la operación del molino en forma continua, en caso necesario, con velocidades mucho menores que las óptimas y el desatasco del molino debido al alto torque de arranque de los accionamientos electro hidráulicos. Las mediciones del torque y de la velocidad en cada maza, también permiten la determinación del torque y la distribución de la potencia en las mazas del molino, lo que proporciona información importante para los diseñadores y usuarios de los molinos. Kent y McKenzie (2001) analizaron los resultados de las mediciones de la distribución del torque en molinos de cuatro mazas, llevadas a cabo por distintos investigadores en Cuba, Colombia, México y Australia y concluyeron que en el molino de cuatro mazas, el torque consumido por la maza superior es de aproximadamente la mitad del torque total consumido por el molino y el torque restante se distribuye de manera equivalente entre las mazas cañera y bagacera. También informaron que cuando se incrementa la velocidad de una maza, el torque de dicha maza se incrementa y el torque de la otra maza de los pares de mazas, se reduce. Lewinski et al. (2010) midieron los valores de torque y de la potencia de molinos de cuatro mazas en tres escenarios. Las mazas rotaban a la misma velocidad en la mayoría de los accionamientos convencionales, con la misma velocidad periférica en las mazas y con velocidades que daban la misma presión en el sistema hidráulico de los motores hidráulicos y una distribución de torque de: 50, 25 y 25%. Una de las observaciones fue que el torque y la potencia de la maza superior fue de aproximadamente 50% del torque total para estos tres escenarios, pero como era de esperarse, el torque de la maza cañera era siempre menor que en la maza bagacera en los dos primeros escenarios. El objetivo principal de la investigación presentada en este trabajo es determinar el torque y el consumo de potencia en molinos de cuatro mazas para distintos ajustes de velocidad de cada maza, distinta velocidad entre las mazas inferiores y superior y para determinar la

distribución del torque y la potencia de los molinos operados en todo el tándem, cuyo trabajo está automatizado.

Automatización de la operación del molino

La automatización de la operación de los molinos de cuatro mazas se realiza generalmente de las siguientes maneras: Para una capacidad de molienda dada, el primer molino se opera a velocidad constante, manteniendo el torque óptimo dentro del molino mediante la variación de la capacidad de alimentación. Para mantener el torque óptimo en los molinos siguientes, su velocidad se ajusta automáticamente. El torque óptimo se puede lograr manteniendo el nivel del chute en un determinado rango, o manteniendo la presión en los sistemas hidráulicos relacionados con los motores que mueven la maza superior. El regulador de nivel del chute intenta mantener el nivel del chute a un nivel especificado, mediante el ajuste de la velocidad del molino. Si el nivel del chute es bajo, la velocidad se reduce y viceversa. La regulación se inicia cuando el nivel del chute se encuentra fuera de la zona muerta. La velocidad tiene un valor máximo y mínimo, para evitar velocidades extremadamente rápidas o extremadamente lentas. La Figura 1 explica la función del control del chute Bosch Rexroth (2012).

CONTROL DEL CHUTE, ACCIÓN HACIA ADELANTE

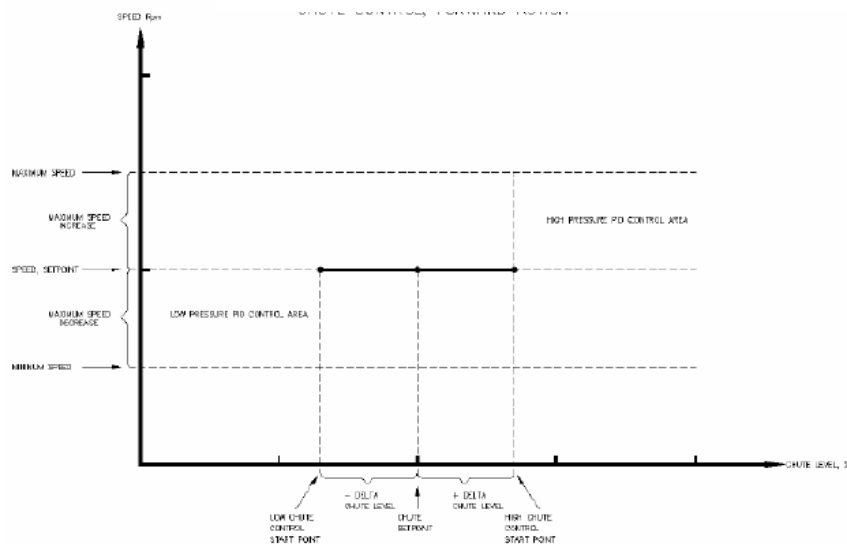


Figura 1. Control de nivel del Chute

El regulador de presión intenta mantener la presión de trabajo en los sistemas relacionados con los motores que mueven la maza superior cerca del punto de ajuste de la presión, mediante el ajuste de la velocidad del molino. Si la presión de trabajo es mayor a, por ejemplo, 25 bar por encima del punto de ajuste, la velocidad se incrementará y viceversa. También hay un punto de ajuste máximo y mínimo de la velocidad (+10% del punto de ajuste de la velocidad). Estos parámetros se pueden modificar en el sistema de control del accionamiento. El punto de ajuste debe estar dentro de un rango de 100 a 250 bar. La Figura 2 explica la función del control de la presión; Bosch Rexroth (2012).

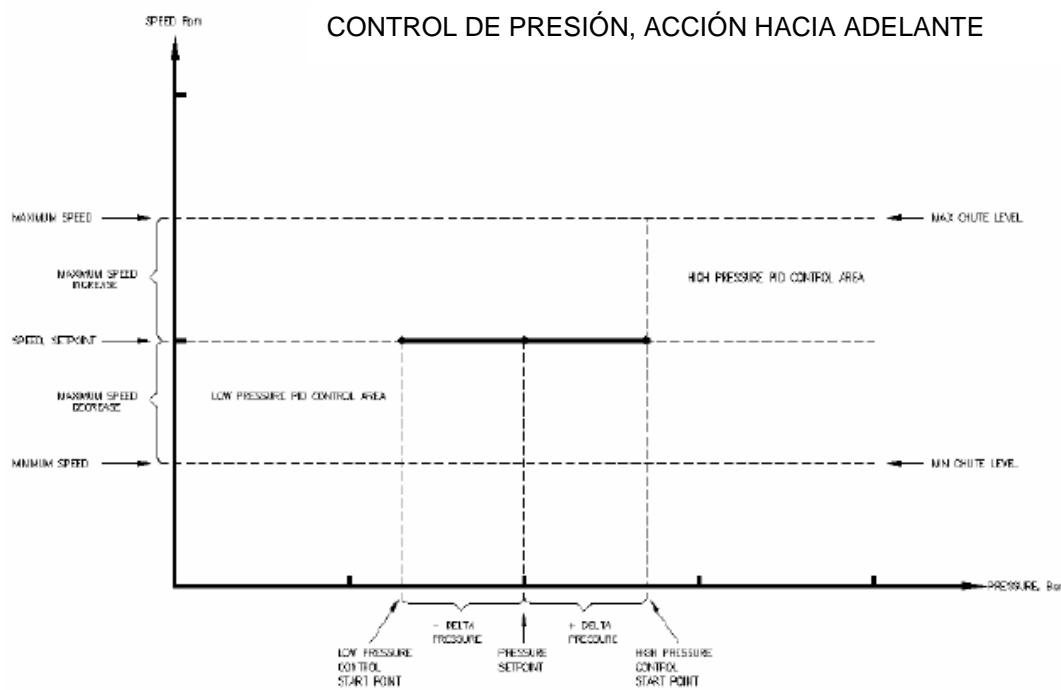


Figura 2. Control de la presión

El control de la presión (torque) permite mantener el torque óptimo independientemente del índice de preparación de la caña, contenido de fibra, contenido de biomasa, etc., lo cual no se puede lograr en caso del control del chute. Por lo demás, las mediciones del nivel del chute no son continuas y pueden verse afectadas por la humedad.

Pruebas en el Ingenio Santa Isabel

Se han registrado todas las presiones de los sistemas hidráulicos y las revoluciones de las mazas desde 2009 y hasta 2012. El tándem de molienda tenía cuatro molinos de cuatro mazas; el primero es de 84 x 46", y los otros de 78 x 42". Desde 2011, se ha agregado el molino 0 al tándem, con un tamaño de 84x46 ". La Figura 3 muestra la disposición de los accionamientos.

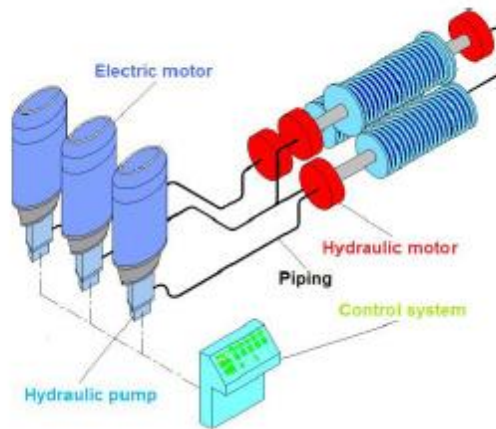


Figura 3. Accionamiento electro hidráulico individual directo

El torque de cada maza se calcula tomando en cuenta el desplazamiento del motor (volumen de aceite necesario para mover una revolución del motor) convertido al torque específico (Nm/unidades de bar) multiplicado por la diferencia entre la presión de trabajo y de carga y por la eficiencia del motor (igual a 0.97 dentro de los estándares del fabricante). La presión de carga es la presión de la línea de retorno del sistema hidráulico, que funciona en el circuito cerrado y es igual a 15 bar en el caso de las aplicaciones del molino. La velocidad de las mazas se midió por los decodificadores digitales de velocidad ubicados en la parte posterior de los motores hidráulicos. Además, se registró también el nivel del chute de cada molino. El molino se operó usando el control del nivel del chute. El

operador realizaba cambios manuales en la velocidad del molino 1, observando la pantalla del control principal para evitar el sobrellenado del tanque con el jugo primario. El ajuste de velocidad de los otros molinos también se reajustó manualmente por el operador, de conformidad con el cambio de velocidad del Molino 1 y tomando en cuenta su propia experiencia. La primera impresión es que esta operación debería manejarse automatizada con el nivel del tanque - control de velocidad del molino para algunos niveles definidos y que el ajuste de velocidad de los molinos restantes debería restablecerse automáticamente de acuerdo con la velocidad real del Molino 1 y los ajustes existentes de los molinos.

Pruebas en el Ingenio Ferrari

El tándem de Ferrari cuenta con cuatro molinos de cuatro mazas del mismo tamaño y tipo que los de Santa Isabel y los accionamientos electro-hidráulicos también son exactamente iguales, considerando el tipo y tamaño. La automatización de los molinos se realiza mediante el control de presión descrito antes y la velocidad definida del molino uno cambia automáticamente, dependiendo del nivel de jugo en el tanque. El operador ajusta manualmente la velocidad establecida de los otros molinos, para evitar el sobrellenado de los chutes, vigilándolos en la pantalla. También se han registrado las presiones de todos los sistemas hidráulicos, las velocidades de los rodillos, los niveles del chute y también la flotación de la maza superior durante los años 2009 y hasta 2012.

RESULTADOS

Se han calculado los torques y la potencia y su distribución sobre la base de la presión y las mediciones de velocidad. Adicionalmente, se han comparado los valores medidos y calculados con los resultados teóricos calculados por el modelo matemático y ecuaciones empíricas simples desarrolladas para determinar el torque en el interior del molino.

La Tabla 1 presenta los resultados promedio obtenidos en el Ingenio de Santa Isabel por varios años de operación y la tabla 2 muestra los resultados obtenidos en el Ingenio Ferrari. Los símbolos TR, CR y BR corresponden a la maza superior, cañera y bagacera y las unidades rpm, Nm y kW se refieren a las velocidades, torques y potencias de los rodillos correspondientes. La figura 4 presenta las gráficas del Ingenio de Santa Isabel. Las figuras 4a a 4d muestran los principales resultados medidos para los cuatro molinos (nivel del chute en %, la presión en el sistema de accionamiento de la maza superior en bar y la velocidad de la maza superior en rpm). El eje vertical izquierdo muestra los valores numéricos para la presión y el nivel del chute y el eje vertical derecho muestra los resultados de la velocidad. Las Figuras 4e a 4h muestran la velocidad de la maza superior (eje vertical izquierdo) y el índice de torque total de la maza superior (eje vertical derecho) para los molinos, en el mismo orden que para las Figuras 4a a 4d. La figura 5 muestra los resultados para el Ingenio Ferrari. Las Figuras 5a a 5d muestran nivel del chute, la presión y la velocidad de los cuatro molinos. La Figura 5e muestra los principales resultados obtenidos para el molino 4 en un periodo más corto, a fin de poder ver la línea de tendencia mejor. La Figura 5F muestra la flotación de la maza superior en mm (eje vertical izquierdo) y el torque total (eje derecho) del molino 4. Fig. 5g muestra lo mismo que la Fig. 5f pero por un período más corto. La Figura 5h muestra la velocidad de la maza superior y la relación entre el torque en la maza superior y el torque total. La Figura

6 muestra los resultados de cuando los autores estaban cambiando la manera de operar el molino del control del chute al control de presión. La figura 7 muestra la comparación entre los comportamientos del molino para distintos sistemas de automatización por un periodo breve de tiempo. La Tabla 3 muestra la comparación de los torques totales registrados y calculados durante las pruebas con los valores obtenidos de la ecuación empírica simple utilizada por Hagglunds (2004) y el modelo matemático desarrollado por Bundaberg Walkers y el Instituto de Investigación del Azúcar Bundaberg Walkers (2012). Para poder aplicar el modelo matemático a los molinos analizados en esta investigación, se han analizado los ajustes reales de los molinos, su flotación y la presión límite, a fin de determinar la apertura real de entrega y la carga real de la maza superior. Los datos para el modelo matemático se tomaron de los datos los molinos de Santa Isabel para el año 2012.

Tabla 1 - Resultados promedio de las pruebas de Santa Isabel por fecha

		Velocidad rpm							Potencia kW			
Date		Speed rpm			Torque Nm				Power kW			
		TR rpm	CR/TR	Br/TR	Tot Nm	TR/Tot	CR/Tot	BR/Tot	Tot kW	TR/Tot	CR/Tot	BR/Tot
29/09	Mill 1	6.5	1.04	0.92	1391719	0.49	0.25	0.26	910.0	0.49	0.27	0.24
2009	Mill 2	6.60	1.05	0.90	922561	0.49	0.25	0.26	617	0.49	0.26	0.24
	Mill 3	6.20	0.99	0.82	896636	0.47	0.26	0.27	541	0.49	0.27	0.24
	Mill 4	6.10	1.05	0.92	904055	0.50	0.24	0.26	558	0.51	0.25	0.24
30/09	Mill 1	6.5	1.03	0.91	1370462	0.50	0.25	0.25	894	0.51	0.27	0.22
2009	Mill 2	6.70	1.05	0.89	927151	0.50	0.24	0.25	627	0.51	0.26	0.23
	Mill 3	6.30	0.98	0.80	895730	0.49	0.26	0.25	543	0.52	0.27	0.21
	Mill 4	6.10	1.06	0.91	903403	0.50	0.25	0.26	558	0.50	0.26	0.24
15/07	Mill 1	5.59	1.03	0.95	1366801	0.56	0.23	0.22	796	0.56	0.24	0.21
2010	Mill2	5.61	1.12	0.95	910525	0.49	0.22	0.28	538	0.49	0.25	0.26
	Mill3	6.64	1.05	0.87	1004400	0.52	0.21	0.27	681	0.53	0.22	0.24
	Mill4	5.92	1.08	0.95	1052012	0.51	0.22	0.27	655	0.51	0.24	0.26
15/08	Mill 1	5.34	1.03	0.95	1344719	0.56	0.23	0.21	750	0.56	0.24	0.20
2010	Mill 2	4.89	1.06	0.95	881561	0.50	0.21	0.29	451	0.50	0.23	0.28
	Mill 3	5.75	1.14	0.90	1051023	0.52	0.21	0.26	635	0.52	0.24	0.24
	Mill4	5.56	1.08	0.94	1052955	0.52	0.21	0.27	615	0.52	0.23	0.25
26/08	Mill 0											
2011	Mill 1	4.21	1.07	0.83	1502286	0.51	0.23	0.25	646	0.53	0.26	0.21
	Mill 2	5.45	1.10	0.94	1070096	0.52	0.20	0.29	613	0.51	0.22	0.27
	Mill 3	5.36	1.20	0.90	1126602	0.51	0.23	0.26	648	0.50	0.27	0.23
	Mill 4											
15/09	Mill 0	5.03	1.03	0.93	1317910	0.54	0.21	0.25	686	0.55	0.22	0.23
2011	Mill 1	4.36	1.07	0.83	1387863	0.55	0.23	0.22	618	0.56	0.25	0.19
	Mill 2	5.01	1.10	0.94	975028	0.53	0.21	0.26	514	0.53	0.23	0.25
	Mill 3	5.10	1.12	0.93	944096	0.54	0.20	0.26	508	0.54	0.23	0.24
	Mill 4	5.07	1.10	0.92	993119	0.53	0.19	0.28	528	0.54	0.21	0.25
23/09	Mill 0											
2011	Mill 1	3.90	1.07	0.84	1441715	0.54	0.21	0.25	573	0.55	0.24	0.21
	Mill 2	4.74	1.10	0.94	1038661	0.53	0.19	0.28	517	0.52	0.21	0.27
	Mill 3	4.69	1.20	0.92	1010381	0.51	0.21	0.28	508	0.50	0.25	0.25
	Mill 4											
21/10	Mill 0											
2011	Mill 1	5.53	1.07	0.82	1303167	0.51	0.22	0.27	727	0.53	0.24	0.23
	Mill 2	5.98	1.10	0.94	1077351	0.52	0.21	0.27	678	0.51	0.23	0.25
	Mill 3	6.00	1.10	0.93	1051825	0.56	0.17	0.26	662	0.56	0.19	0.25
	Mill 4											
14/08	Mill 0	5.79	1.07	0.92	1451440	0.53	0.21	0.26	875	0.54	0.23	0.24
2012	Mill 1	5.74	1.05	0.91	1362745	0.51	0.24	0.26	807	0.51	0.25	0.23
	Mill 2	5.93	1.06	0.94	1111886	0.51	0.22	0.26	689	0.51	0.24	0.25
	Mill 3	5.89	1.13	0.94	1045334	0.53	0.21	0.26	653	0.53	0.23	0.24
	Mill 4	5.77	1.19	0.94	1074683	0.54	0.20	0.26	665	0.53	0.23	0.24
15/07	Mill 0	5.92	1.04	0.92	1387922	0.56	0.18	0.25	847	0.57	0.19	0.24
2012	Mill 1	6.39	1.05	0.91	1299875	0.54	0.21	0.25	859	0.54	0.23	0.23
	Mill 2	5.66	1.00	0.92	1034772	0.50	0.24	0.26	601	0.51	0.24	0.24
	Mill 3	5.72	1.10	0.92	1007992	0.50	0.25	0.25	608	0.50	0.27	0.23
	Mill 4	5.58	1.15	0.95	1044981	0.52	0.21	0.28	623	0.51	0.24	0.26

Tabla 2 - Resultados promedio de las pruebas de Ferrari por fecha

		Velocidad rpm				Potencia kW						
Date	Mill	TR rpm	Speed rpm		Tot Nm	Torque Nm			Tot. kW	Power kW		
			CR/TR	BR/TR		TR/Ttotal	CR/Total	BR/Total		TR/Tot	CR/Tot	BR/Tot
1/9/2011	Mill1	4.40	1.04	0.94	1532059	0.53	0.23	0.24	704	0.53	0.24	0.23
	Mill2	5.65	1.00	0.91	1017050	0.46	0.27	0.27	586	0.47	0.27	0.26
	Mill 3	5.07	0.99	0.90	1025424	0.45	0.26	0.29	527	0.46	0.27	0.27
	Mill 4	4.86	1.04	0.92	1127844	0.51	0.23	0.26	568	0.51	0.24	0.25
2/9/2011	Mill 1	4.14	1.04	0.94	1509429	0.51	0.23	0.25	650	0.52	0.24	0.24
	Mill 2	5.16	1.00	0.90	1026277	0.47	0.27	0.27	540	0.48	0.27	0.24
	Mill 3	4.61	0.98	0.88	1033473	0.48	0.26	0.26	481	0.50	0.26	0.24
	Mill 4	4.49	1.05	0.92	1131673	0.49	0.26	0.26	527	0.49	0.27	0.24
5/8/2011	Mill 1	4.23	1.06	0.96	1491591	0.49	0.25	0.27	664	0.49	0.26	0.25
	Mill2	4.77	1.01	0.93	1036576	0.48	0.26	0.26	510	0.48	0.27	0.25
	Mill3	4.54	0.99	0.91	1006781	0.47	0.26	0.27	466	0.48	0.27	0.25
	Mill 4	4.41	1.01	0.95	1115607	0.49	0.26	0.25	511	0.50	0.27	0.24
8/8/2011	Mill 1	4.83	1.06	0.96	1517313	0.50	0.24	0.26	772	0.50	0.25	0.25
	Mill2	5.76	1.01	0.93	1048853	0.44	0.28	0.28	623	0.45	0.29	0.27
	Mill 3	5.32	0.99	0.91	1023069	0.45	0.27	0.28	555	0.46	0.27	0.27
	Mill 4	5.08	0.98	0.96	1120798	0.54	0.24	0.23	589	0.54	0.24	0.22
12/9/2011	Mill 1	4.22	1.04	0.94	1454733	0.51	0.24	0.25	639	0.51	0.25	0.23
	Mill 2	4.93	1.05	0.90	986206	0.45	0.30	0.25	504	0.46	0.32	0.22
	Mill 3	4.64	0.98	0.88	1028536	0.47	0.27	0.26	482	0.49	0.28	0.24
	Mill 4	4.56	1.05	0.92	1128990	0.51	0.25	0.24	536	0.51	0.26	0.22
13/08/12	Mill 1	5.34	1.12	1.07	1545156	0.52	0.23	0.25	902	0.50	0.25	0.25
	Mill 2	6.41	1.04	0.96	859430	0.43	0.28	0.29	574	0.43	0.30	0.27
	Mill 3	5.63	1.06	0.93	995086	0.49	0.24	0.27	584	0.49	0.26	0.25
	Mill4	5.69	1.08	0.92	1076059	0.52	0.24	0.24	641	0.52	0.26	0.22
14/08/12	Mill 1	5.45	1.12	1.07	1549230	0.51	0.23	0.25	924	0.49	0.25	0.26
	Mill2	6.31	1.05	0.96	985335	0.42	0.29	0.28	650	0.42	0.30	0.27
	Mill 3	5.72	1.06	0.93	996729	0.48	0.24	0.28	593	0.48	0.26	0.26
	Mill 4	5.73	1.08	0.92	1073555	0.52	0.24	0.24	644	0.52	0.26	0.22
20/07/11	Mill 1	4.53	1.05	0.96	1470981	0.54	0.21	0.25	698	0.54	0.22	0.24
	Mill 2	5.05	1.01	0.93	1049123	0.49	0.25	0.27	546	0.49	0.25	0.25
	Mill 3	4.83	1.00	0.92	1028015	0.48	0.24	0.27	509	0.49	0.25	0.26
	Mill 4	4.60	1.03	0.95	1135841	0.51	0.23	0.26	545	0.51	0.24	0.25
29/06/12	Mill 1	5.27	1.08	1.12	1514187	0.53	0.19	0.27	876	0.51	0.20	0.29
	Mill 2	8.00	1.00	0.96	708021	0.41	0.26	0.32	585	0.42	0.27	0.31
	Mill 3	6.11	1.06	0.96	995386	0.48	0.26	0.26	640	0.48	0.28	0.25
	Mill 4	5.65	1.07	0.98	1045467	0.51	0.23	0.26	625	0.51	0.25	0.25
29/06/12 B	Mill 1	5.26	1.08	1.08	1513046	0.56	0.20	0.24	862	0.54	0.21	0.26
	Mill 2	7.62	0.99	0.95	815892	0.44	0.27	0.30	634	0.45	0.27	0.29
	Mill 3	5.89	1.06	0.94	1018347	0.49	0.24	0.26	628	0.49	0.26	0.25
	Mill 4	5.50	1.07	0.95	1062973	0.53	0.23	0.24	615	0.53	0.24	0.23
29/07/11	Mill 1	4.37	1.06	0.96	1433361	0.54	0.21	0.25	657	0.53	0.23	0.24
	Mill2	4.99	1.03	0.91	1022200	0.47	0.27	0.26	526	0.48	0.28	0.24
	Mill 3	4.72	1.01	0.89	1011926	0.48	0.26	0.26	487	0.49	0.27	0.24
	Mill 4	4.64	1.04	0.95	1109490	0.50	0.24	0.25	538	0.50	0.25	0.24
30/06/12	Mill 1	5.08	1.08	1.08	1525628	0.56	0.19	0.25	839	0.54	0.20	0.26
	Mill 2	7.67	0.99	0.98	725076	0.40	0.26	0.34	574	0.40	0.26	0.33
	Mill 3	5.87	1.06	0.94	1016126	0.49	0.25	0.26	623	0.49	0.26	0.25
	Mill 4	5.40	1.07	0.95	1060836	0.52	0.23	0.25	602	0.52	0.25	0.23
30/09/09	Mill1	6.00	0.96	0.96	1321233	0.50	0.25	0.25	813	0.51	0.24	0.25
	Mill2	6.25	1.00	0.98	983849	0.51	0.26	0.23	640	0.51	0.26	0.23
	Mill 4	5.61	0.94	1.00	1135776	0.49	0.26	0.24	656	0.50	0.25	0.25



Figura 4. Gráficas del Ingenio Azucarero de Santa Isabel.

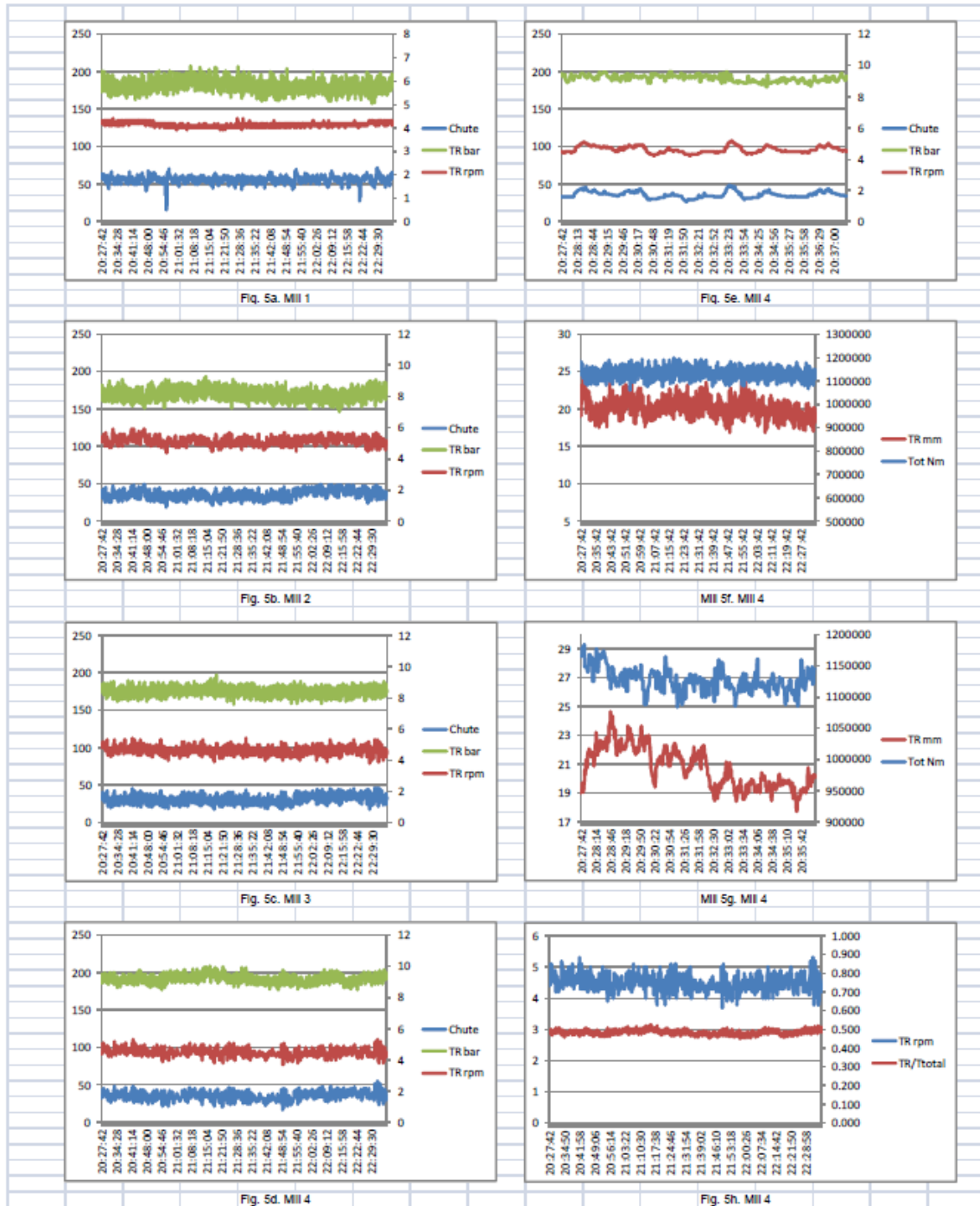


Figura 5. Gráficas del Ingenio Azucarero de Santa Isabel.

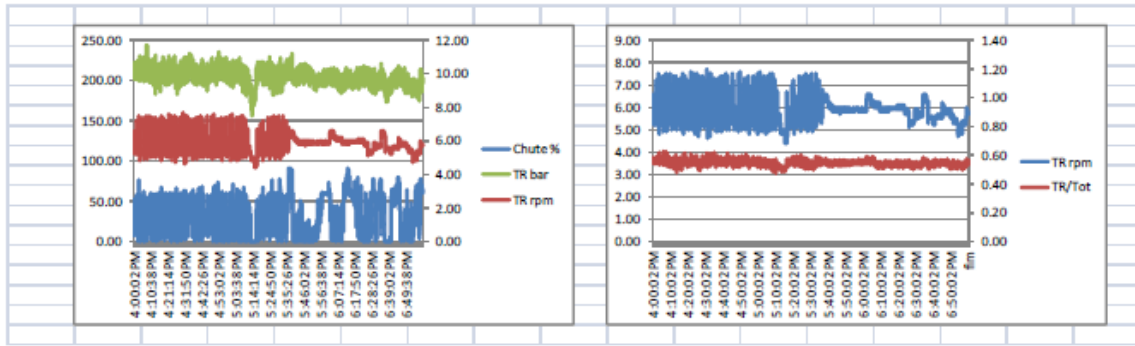


Figura 6. Gráficas del Ingenio de Santa Isabel 4

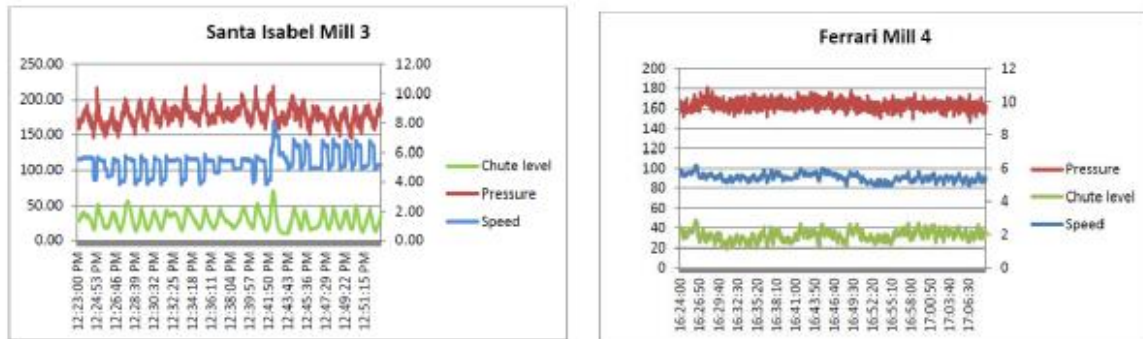


Figura 7. Comparativo entre las gráficas para los distintos controles de automatización

Tabla 3 - Torque promedio: valores medidos y teóricos en Nm

	Hagglunds	Bundaberg Walkers	Sta. Isabel 2009-2012	Sta. Isabel 2012	Ferrari 2009-2012
Mill 0	1308680	1309988	1385757	1387922	
Mill 1	1308680	1163285	1377135	1299875	1490611
Mill 2	1091120	1088567	994959	1034772	943376
Mill 3	1091120	1034466	1003402	1007992	1014908
Mill 4	1091120	953181	1003601	1044981	1101916

Los resultados muestran que la operación del molino en el caso de automatización del control de presión es mucho más estable que en el caso del control de nivel del chute. La variación en la velocidad de los molinos 2, 3, etc, y la variación de las presiones (torques) es mucho menor cuando se usa el control de presión, y la variación del nivel del chute es también mucho menor para este modo de automatización. Cuando los autores estaban modificando la forma de operar el molino, cambiando de control del chute a control de la presión, la operación del molino era mucho más estable, pero existía el riesgo de sobrellenado del chute (Fig. 6). Por supuesto, este problema puede resolverse determinando correctamente todos los parámetros del sistema de control. Los valores de los torques medidos son muy similares a los valores calculados para las ecuaciones teóricas y empíricas y las diferencias en los torques entre Santa Isabel y Ferrari son resultado de la diferencia en la presión en los cabezales en dichos ingenios. La observación más importante es que el torque promedio en la maza superior se encuentra siempre dentro de un rango de 50 a 55% del torque total, para una operación del molino dentro del rango de velocidades que se utilizan en los ingenieros azucareros. Esta observación es válida para las diversas velocidades de ajuste de los molinos, las distintas relaciones de velocidad entre los rodillos superior e inferiores y las distintas proporciones de torque entre los rodillos inferiores. Los valores medidos en 2012 para el molino 2 de Santa Isabel, que fueron inferiores a 50%, son el resultado de un trabajo muy inestable de este molino, que obedeció a un problema técnico en el interior del molino. Las mismas observaciones son válidas para las potencias. Estos resultados muestran que el torque total es entonces la suma del torque desarrollado entre la maza superior y la maza cañera, entre la maza superior y la maza bagacera y entre la maza superior y la cuarta maza.

CONCLUSIONES

La operación de los ingenios azucareros puede ser fácilmente automatizada con los accionamientos electro hidráulicos, manteniendo el torque óptimo en el interior del molino, independientemente del ajuste de velocidad (capacidad de molienda), la preparación de la caña, la fibra y el contenido de biomasa. La operación del molino en caso de automatización del control de la presión es mucho más estable que en el caso del control de nivel del chute. La variación de velocidad de los molinos de 2, 3, etc, y la variación de las presiones (torques) es mucho menor usando el control de presión y además, la variación del nivel del chute es mucho menor para esta forma de automatización. La automatización del molino con control de nivel del chute siempre es fácil de hacer y puede resultar más fácil evitar un inesperado sobrellenado del chute. El torque promedio en la maza superior se encuentra siempre dentro de un rango de 50 a 55% del torque total, para una operación estable del molino dentro del rango de velocidades que se utilizan en los ingenios azucareros. Esta observación es válida para distintos ajustes de velocidad de los molinos, distintas relaciones de velocidad entre las mazas inferiores y superior y distintas proporciones de torque entre las mazas inferiores. Lo mismo es válido para las potencias. Se puede concluir que el torque total es entonces la suma del torque desarrollado entre la maza superior y la maza cañera, entre la maza superior y la maza bagacera y entre la maza superior y la cuarta maza. En todos los pares de rodillos que participan en exprimir, si la velocidad de una maza se incrementa, el torque en esta maza también se incrementa, ya que ahora una maza empuja contra la otra a través del bagazo comprimido. Por la misma razón, el torque en de la otra maza disminuye. También se puede concluir que la maza superior en cada etapa de extracción de jugo, en paralelo con la maza cañera y la bagacera, consume la porción del torque consumido por las mazas inferiores correspondientes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa Bosch Rexroth de Suecia y a Bosch Rexroth de Brasil por su interés en esta investigación y el apoyo económico correspondiente. Gracias al personal de los Ingenios Azucareros de Santa Isabel y Ferrari, por su apoyo y gran colaboración para hacer posible esta investigación - un especial agradecimiento al Sr. Carlos Graton. Gracias al Sr. Mario Sato por su permiso para utilizar como referencia sus ajustes en el Ingenio de Santa Isabel. Un agradecimiento especial a Glen Wesche de Bundaberg Walkers, por su ayuda y colaboración en la definición teórica del torque.

BIBLIOGRAFIA

- Bosch Rexroth. (2012). Manual de Ingeniería del Spider Control System [Sistema de Control Spider de Hägglunds] EN777-6 BR2012.
- Bundaberg Walkers. (2012). Comunicación personal.
- Hägglunds. (2004). Drives Sizing [Tamaño de los Accionamientos]. Presentación interna.
- Kent, G.A. y McKenzie, N.J. (2001). The distribution of torque in a three-roll mill [La distribución del torque en un molino de tres mazas]. Proc. Int.Soc. Sugar Cane Technol., 24: 220-225.
- Lewinski, J. (2005). Electro-hydraulic assist drives for sugar mills [Accionamientos electro hidráulicos de apoyo para los ingenios azucareros]. ISJ, 107: 532–538.
- Lewinski, J., Grassmann, P. y Kallin, T. (2010). Sugar mill operation with individual drives [Operación del molino azucarero con accionamientos individuales]. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 27:

Wesche, G., Payne, S., Lewinski,J. (2011). Comparison between four roll and six roll mill
[Comparativo entre un molino de cuatro mazas y uno de seis mazas].
SugarJournal, 11 de marzo: 22-25.