
OTIMIZANDO A PRODUTIVIDADE DE MÁQUINAS DE PAPEL ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

ENG^o REMO ALBERTO PIERRI
Diretor Técnico da Aditeq

Na referência (1), mostramos que a análise das vibrações geradas pelo funcionamento das máquinas permite detectar falhas potenciais e revelar suas origens, sem interrupção do processo produtivo e com antecedência suficiente para definir o momento mais oportuno para a realização das intervenções corretivas, de forma a minimizar o seu impacto sobre a produção.

Os defeitos de funcionamento podem ser detectados e avaliados através do acompanhamento dos níveis de vibração, enquanto que o diagnóstico de suas origens é feito, principalmente, através da análise comparativa das frequências de vibração com as frequências características de funcionamento dos diversos componentes das máquinas.

Dessa forma, pode-se realizar um planejamento dirigido e antecipado das intervenções corretivas, reduzindo-se os prazos e custos dessas intervenções, pelo conhecimento antecipado dos componentes a serem substituídos e pela redução da troca de componentes com uma vida útil remanescente ainda significativa.

As mesmas técnicas podem ser empregadas também para a avaliação do estado dos equipamentos logo após as intervenções, resultando numa maior confiabilidade na entrega dos equipamentos para operação e na eliminação de retornos e quebras catastróficas.

Esse método de trabalho, conhecido como Manutenção Preditiva, resulta também num aumento da segurança e da disponibilidade dos equipamentos, com redução dos riscos de acidentes e interrupções inesperadas da produção, assim como num aumento da vida útil das máquinas e componentes, que passam a funcionar em condições melhor conhecidas e controladas.

A médio prazo, através da análise estatística dos dados levantados pela Manutenção Preditiva, é possível identificar problemas crônicos e propor melhorias da engenharia de projeto, instalação e operação das máquinas. Também é possível realizar avaliações do desempenho do pessoal de manutenção e orientar planos de treinamento, visando o seu aprimoramento na correção dos problemas críticos, detectados com maior frequência.

Neste trabalho serão apresentadas, através de exemplos reais, algumas das técnicas de detecção e diagnóstico de defeitos em Máquinas de Papel, empregadas pelo autor durante a implantação de um Programa de Manutenção Preditiva em uma das principais indústrias de papel do estado de S. Paulo, no período de 1996 a 1998.

Nesse período foram monitoradas oito máquinas de papel, com medições mensais em cerca de 300 mancais por máquina, em 2 direções por mancal, perfazendo um total de cerca de 4.000 medições por mês. As máquinas supervisionadas desenvolviam velocidades na faixa de 300 a 750 m/min.

TÉCNICAS PREDITIVAS APLICADAS A MÁQUINAS DE PAPEL

De uma forma geral, um programa de manutenção preditiva tem por objetivos:

1. Detectar falhas de funcionamento das máquinas sob supervisão e avaliar a sua severidade
2. Identificar a sua origem e recomendar formas de correção.

Para a consecução do primeiro objetivo é necessário, inicialmente, estabelecer escalas de avaliação dos níveis de vibração que contemplem os diversos componentes das máquinas em diferentes velocidades e condições de funcionamento.

Isso é uma tarefa complexa, uma vez que uma Máquina de Papel é composta por centenas de rolos e cilindros, com diferentes diâmetros, tipos e funções (vide tabela I), fixados de maneiras diversas a estruturas de grande porte e complexidade e acionados por motores elétricos e redutores, através de cardans e/ou sistemas de eixos-árvore, polias e correias.

Com base em estudos estatísticos das medições e análises coletadas durante os três primeiros meses de trabalho foi desenvolvida uma escala de avaliação que tem sido periodicamente revisada e ampliada de modo a incluir mais componentes e outras condições de operação.

Para a detecção mais antecipada de defeitos, além dos alarmes por Nível Global, foram empregados também alarmes por faixas de frequência. Na tabela II são apresentadas as faixas e os limites de alarme adotados para os rolos guia feltro da parte úmida.

Além disso, após a sexta medição, passam a prevalecer no nosso critério de avaliação limites estatísticos calculados para cada ponto de medida, a partir das curvas de tendência levantadas nesse período. Esses limites são recalculados após cada seqüência de seis medições.

Dada as suas características construtivas e de funcionamento, a análise das vibrações de máquinas de papel pode se transformar numa tarefa ainda mais complexa do que a sua avaliação.

Existem dificuldades específicas, relacionadas com as velocidades de rotação bastante reduzidas, principalmente nos rolos e cilindros de maior diâmetro, com as grandes distâncias entre os seus mancais e com a transmissão de vibrações e a interação entre os diversos componentes da máquina.

Nas prensas, os rolos de pressão são fortemente acoplados pelas forças ativas e reativas que surgem nas linhas de ação ("nips"). No setor de secagem existe também uma grande transmissão de vibrações entre os cilindros secadores através das suas engrenagens de acionamento.

Dessa forma, é comum encontrar vibrações muito elevadas em um determinado rolo ou cilindro que tenham sua origem nas imperfeições ou mal funcionamento de outro componente, dificultando a determinação precisa da sua origem e a avaliação da sua real severidade.

Além das causas triviais de vibrações comuns a todas as máquinas rotativas, como desbalanceamento, desalinhamento, folgas, etc..., as máquinas de papel também apresentam problemas bastante específicos.

De uma maneira geral, os problemas de funcionamento mais comuns em máquinas de papel podem se classificados como:

- Problemas Relacionados com os Rolos
 - Desbalanceamento do Rolo
 - Desalinhamento dos Mancais
 - Folgas de Montagem
 - Excentricidade Geométrica
 - Empenamento das Pontas de Eixo
 - Ovalização / Ondulação da Superfície
 - Deterioração do Revestimento
 - Defeito nos Rolamentos
- Problemas Relacionados com os Acionadores
 - Defeitos elétricos e mecânicos nos motores
 - Defeitos na alimentação elétrica dos motores
 - Defeitos mecânicos na transmissão (engrenagens, cardans, etc...)
- Problemas Relacionados com Feltros e Telas
 - Defeito nas Bordas
 - Defeito nas Emendas
 - Variações de Espessura
- Problemas Relacionados com o Processo
 - Flutuações de Pressão nos Atuadores das Prensas
 - Variações de Espessura da Folha, originadas no Sistema de Alimentação
 - Condições de Operação Inadequadas (pressão, velocidade do papel, sincronia)
- Problemas Estruturais
 - Ressonâncias
 - Rigidez Inadequada

DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS

Para detectar defeitos em rolamentos foram empregados quatro métodos:

- 1) Acompanhamento dos níveis globais da velocidade de vibração
- 2) Acompanhamento dos níveis da velocidade de vibração por faixas de frequência (vide exemplos da tabela II)
- 3) Acompanhamento dos níveis e espectros do envelope das vibrações
- 4) Acompanhamento dos níveis de aceleração das vibrações de altas frequências (faixa de 1kHz a 10kHz – parâmetro 6 da Tabela II)

Com relação a eficiência desses métodos, pode-se constatar o seguinte:

- 1) O acompanhamento dos níveis globais não foi suficiente para detectar todos os defeitos com antecedência adequada, principalmente nos casos de menor velocidade de rotação.
- 2) O acompanhamento dos níveis por faixas de frequência permitiu detectar a grande maioria dos defeitos com antecedência adequada.
- 3) O acompanhamento do envelope das vibrações produziu resultados consistentes e, na maioria dos casos, com grande antecedência em relação aos demais métodos.

4) O acompanhamento dos níveis das vibrações de altas frequências somente produziu resultados consistentes para velocidades de rotação acima de 800 rpm, o que restringiu a aplicação desse método a eixos de alta rotação de acionadores e a equipamentos auxiliares como bombas, refinadores, etc... Entretanto, ele se mostrou capaz de detectar outros defeitos desses equipamentos como folgas e trincas em componentes rotativos, tais como buchas de fixação de rolamentos, má lubrificação e cavitação.

Com relação à variação dos espectros das vibrações durante a evolução dos defeitos em rolamentos, na maioria dos casos, verificou-se que:

- 1) Durante a fase inicial, os espectros apresentavam predominância dos harmônicos das frequências de defeitos de ordem 4 a 6.
- 2) As amplitudes dos harmônicos de ordem 1 a 3 aumentavam com a progressão dos defeitos, até se tornarem comparáveis aos demais.
- 3) Quando os espectros apresentavam predominância dos harmônicos de ordem 1 a 3, o rolamento praticamente havia atingido o final de sua vida útil.

EXEMPLO: ROLO INFERIOR DE PRENSA OFFSET – MANCAL DO LADO COMANDO

Através da figura 1 pode-se observar que desde a primeira medição (16/01/97) a vibração axial desse mancal (2,6 mm/s) era superior ao limite de alarme adotado (1,8 mm/s). O espectro dessas vibrações apresentava harmônicos de ordem 4 a 6 da frequência de defeitos na pista externa do rolamento.

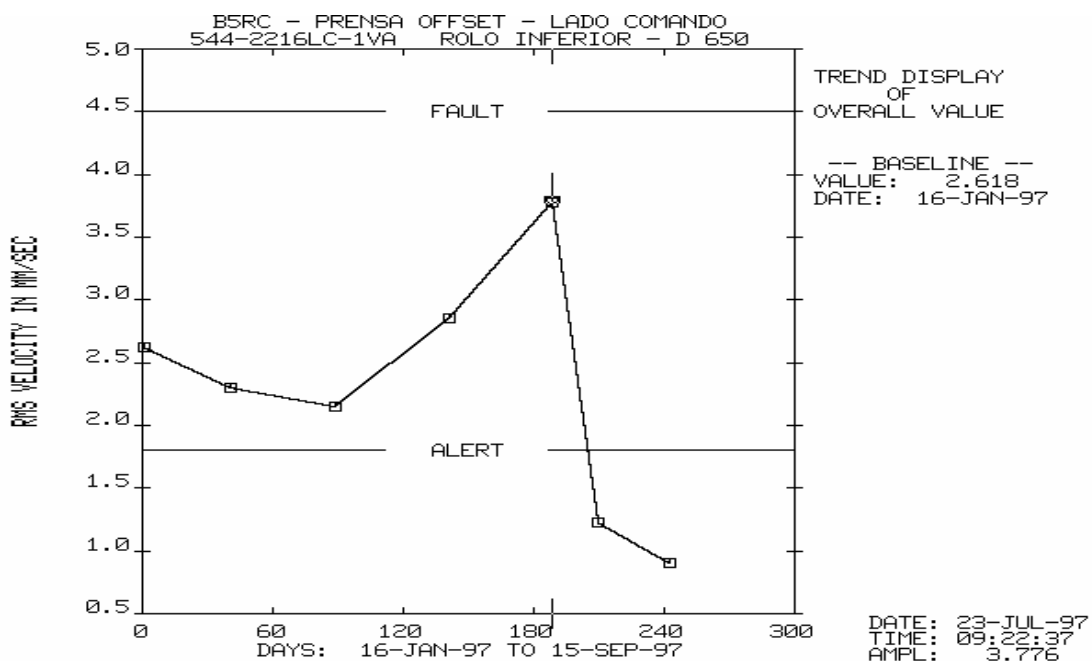


Figura 1 - Curva de Tendência - Máq. 2 - Rolo Inferior Prensa Off Set - LC - Axial Defeito no Rolamento 22330C Detectado em 01 / 97 e Corrigido em 07 / 97

Como o papel produzido estava em pico de demanda e a substituição desse rolo exigia uma parada muito longa, foi decidido adiar a intervenção até que as vibrações atingissem níveis próximos do limite de falha (4,5 mm/s), o que ocorreu em 23/07/97.

No espectro registrado nessa ocasião (figura 2) os harmônicos de ordem 1 a 3 já apresentavam amplitude elevada, indicando que o rolamento se encontrava no fim da sua vida útil.

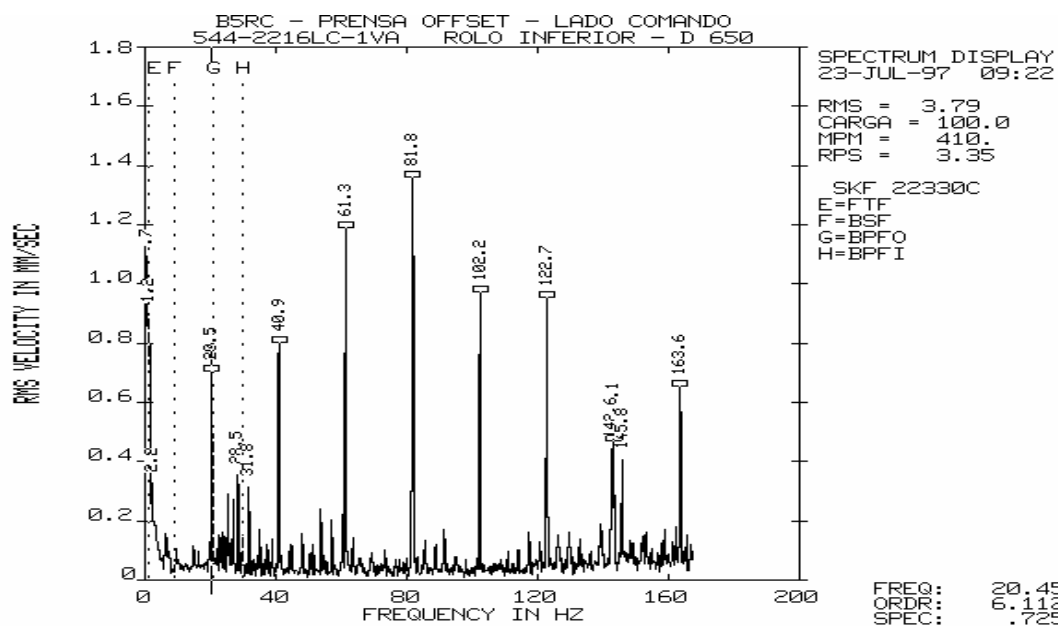


Figura 2 – Espectro de Freqüência - Máq. 2 - Rolo Inferior Prensa Off Set - LC - Axial Defeito no Rolamento 22330C em 23 / 07 / 97

Neste caso, com monitoração adequada, a máquina pode operar normalmente por um prazo de 6 meses após a detecção do defeito e a sua correção pode ser programada para uma data conveniente. Vários casos semelhantes ocorreram durante o período em estudo.

DEFEITOS EM PRENSAS

Muitas vezes, a interação entre as forças dinâmicas desenvolvidas nas prensas pode provocar modulação na amplitude das vibrações, o que pode ser um sintoma importante para diagnosticar a causa do problema, como veremos nos exemplos apresentados a seguir.

Essa técnica de análise se mostrou de extrema valia na fase de início de produção em larga escala de papel de base alcalina.

Nessa fase, enquanto se definiam novos materiais de revestimento dos rolos de pressão, capazes de resistir ao ataque químico do novo produto, a freqüência de ocorrência de defeitos em revestimento se tornou muito elevada e, em certas máquinas, foi necessário adotar uma freqüência quinzenal para monitoração das prensas, até que a situação se normalizasse.

DEFEITOS EM REVESTIMENTOS DE ROLOS DE PRESSÃO

Um rolo de pressão com 13 ondulações, girando a 180 rpm, provoca vibrações a 2340 cpm ou 39 Hz. Se o desbalanceamento residual for localizado e não muito reduzido, essas vibrações aumentam de intensidade sempre que a região de maior massa do rolo passa pela linha de ação ("nip"), resultando uma forma de onda semelhante a representada na figura 3, com a amplitude da vibração de 2340 cpm variando 180 vezes por minuto.

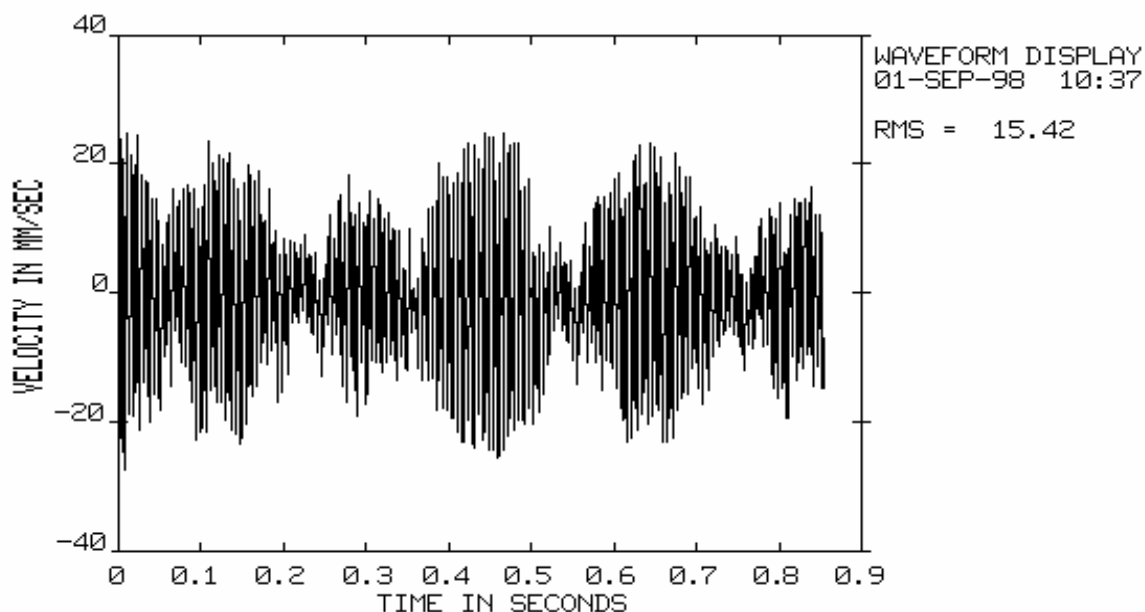
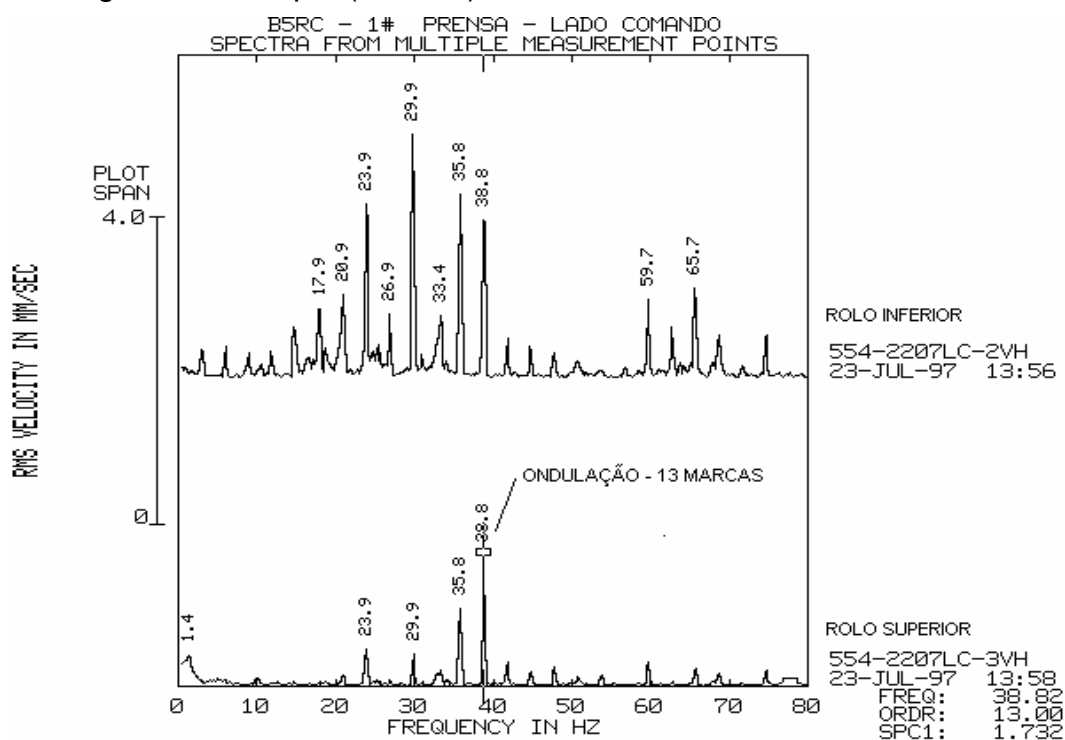


Figura 3 – Forma de Onda de uma Vibração com Modulação de Amplitude

A frequência da modulação pode ser mais facilmente medida no espectro, aonde ela se manifesta na forma de bandas laterais, isto é, de componentes igualmente espaçadas ao redor de uma componente central (portadora). O intervalo de frequência entre essas componentes é a frequência de modulação.

Na figura 4 são apresentados os espectros de vibração dos rolos de uma Prensa. O Rolo Superior possui diâmetro de 720 mm e girava a 180 rpm (3,00 Hz), enquanto que O Rolo Inferior girava a 199 rpm (3,32 Hz) e seu diâmetro é de 650 mm.



**Figura 4 - Espectro das Vibrações - 1a. Prensa – Máquina 2 - 23 / 07 / 97
Defeito no Revestimento do Rolo Superior**

Por razões estruturais as maiores amplitudes de vibração eram observadas no Rolo Inferior, porém o espaçamento das bandas laterais dos espectros (exatamente 3,0 Hz) indicava claramente que as vibrações se originavam no Rolo Superior, cujo revestimento apresentava 13 ondulações, como se comprovou na parada de intervenção.

Esse exemplo mostra a importância de se empregar condições de aquisição de dados adequadas de forma a garantir uma resolução suficiente para se identificar o rolo defeituoso.

DEFEITOS EM FELTROS DE PRENSAS

Defeitos nos feltros também provocam modulação de amplitude e podem ser diagnosticados de forma semelhante, como ilustrado no exemplo seguinte.

O espectro da figura 5, captado junto ao mancal LC do rolo superior de uma prensa, apresenta um pico máximo a 18 N com bandas laterais espaçadas de 0,2N, correspondente a frequência de passagem de um defeito do feltro pelo “nip” (N = frequência de rotação do rolo).

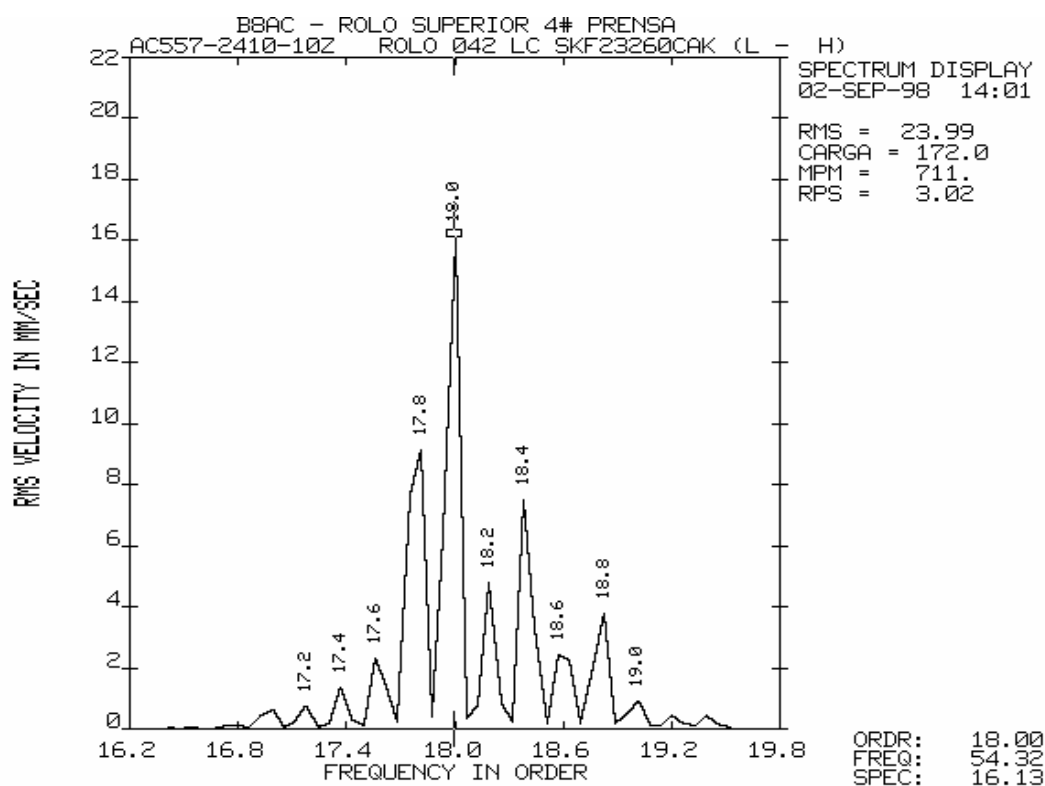
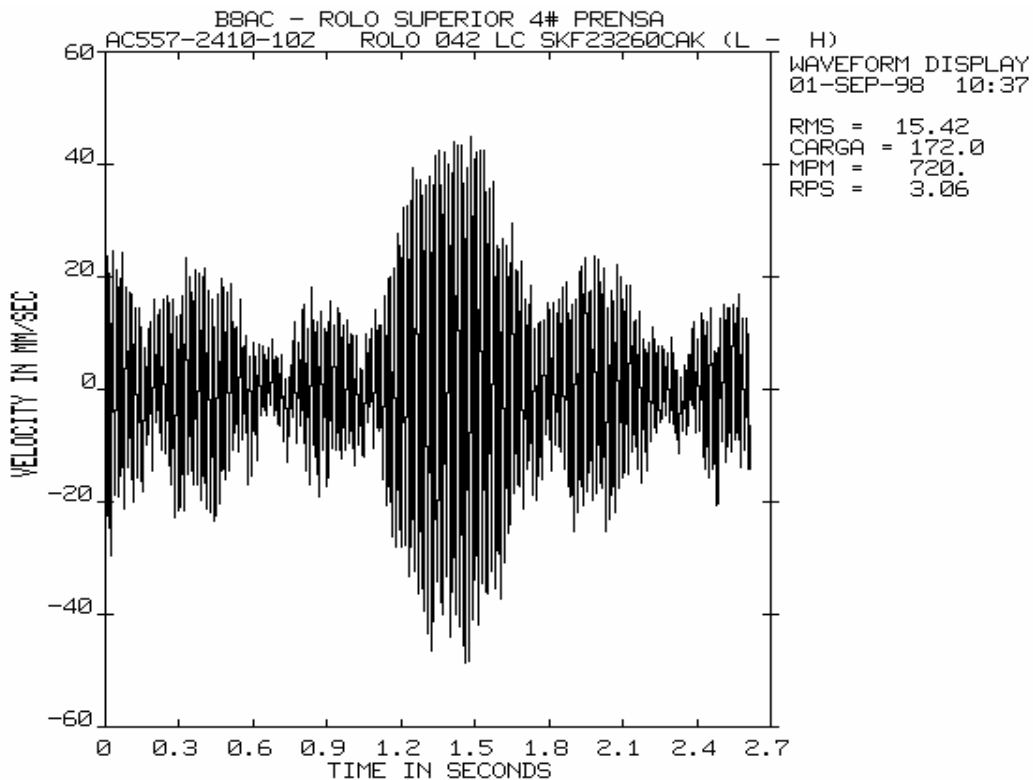


Figura 5 - Espectro das Vibrações - 4a. Prensa – Máquina 1 - 02 / 09 / 98
Defeito no Feltro

A forma de onda correspondente é representada na figura 6 e mostra a ocorrência de impactos com intensidade bastante variável a cada volta do feltro pela prensa.

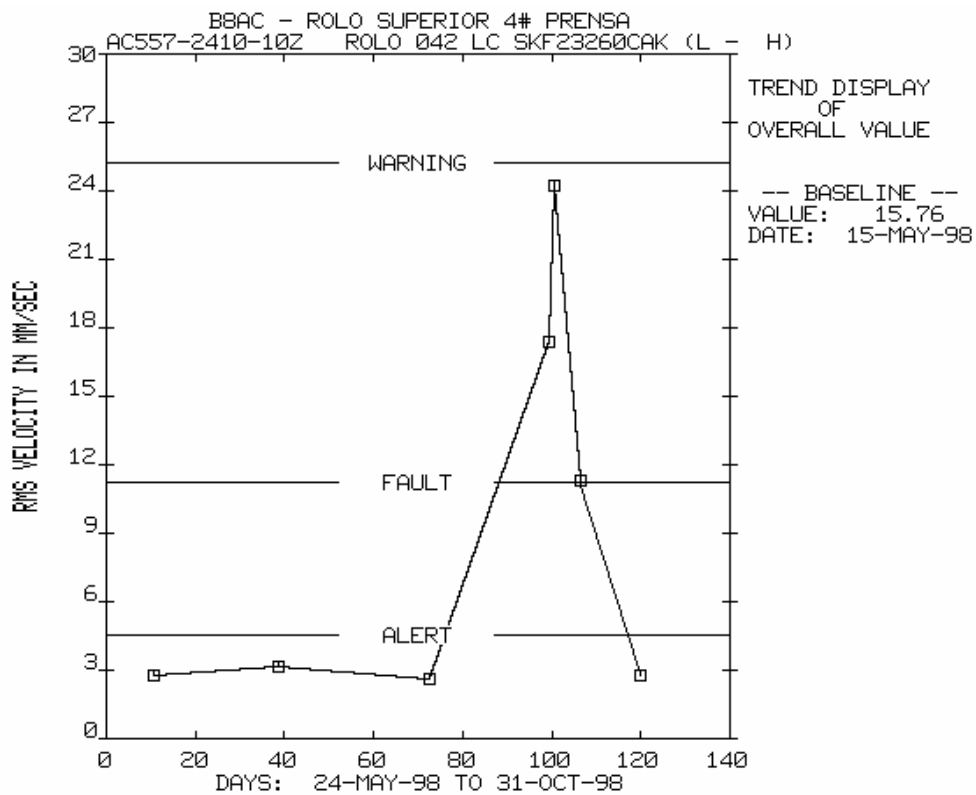
É interessante notar que, durante a coleta de dados, houve uma movimentação maior do feltro, responsável por um grande aumento da amplitude de vibração.

Para reduzir esse efeito, a tensão do feltro foi aumentada, o que diminuiu a ocorrência de picos esporádicos de grande intensidade, tornando a forma de onda mais estável e reduzindo o desgaste do feltro, já bastante acelerado.



**Figura 6 – Forma de Onda das Vibrações - 4a. Prensa – Máquina 1 - 02 / 09 / 98
Defeito e Tensão Inadequada no Feltro**

A curva de tendência da figura 7 mostra que os níveis de vibração passaram de 3,0 para 18,0 a 24,0 mm/s após o aparecimento do defeito no feltro.



**Figura 7 – Níveis de Vibração - 4a. Prensa – Máquina 1
Defeito do Feltro e operação controlada até a parada e correção**

Tendo em vista a proximidade de uma parada programada da fábrica e visando reduzir o impacto sobre a produção, decidiu-se operar a máquina com menor velocidade, de modo que as vibrações se mantivessem dentro de um limite mais tolerável (da ordem de 11 mm/s), e que o feltro resistisse até a parada.

Após a troca do feltro, durante a parada programada, os níveis de vibração voltaram a faixa normal, ao redor de 3 mm/s.

Deve-se ressaltar que, para a detecção desse tipo de defeito é necessário dispor de equipamentos com resolução bastante elevada e empregar técnicas adequadas de análise e aquisição de dados .

A separação entre dois picos consecutivos do espectro da figura 5 é de apenas 0,6 Hz (36,2 cpm). Para distinguir esses picos é necessário empregar, pelos menos, um resolução quatro vezes menor do que a sua separação, isto é: 0,15 Hz.

CONCLUSÕES

Foram apresentadas várias técnicas para a detecção de defeitos em Máquinas de Papel, que permitem obter reduções bastante expressivas nos custos de manutenção e realizar um planejamento antecipado das intervenções corretivas, de modo a compatibilizar as necessidades de manutenção com os objetivos de produção, aumentando consideravelmente a produtividade da fábrica.

Além das técnicas apresentadas, também foram desenvolvidas outras mais sofisticadas para a análise de casos específicos que, por limitação de espaço, não puderam ser abordadas neste artigo:

- Média Temporal Síncrona, para avaliação da contribuição de cada componente nas vibrações das prensas e diagnóstico de problemas em revestimento de rolos de pressão de mesmo diâmetro.
- Mapeamento de vibrações em sistemas de acionamento de Grupos Secadores para localização de componentes defeituosos.
- Análise de Pulsação de Pressão em sistemas de alimentação de massa de papel.

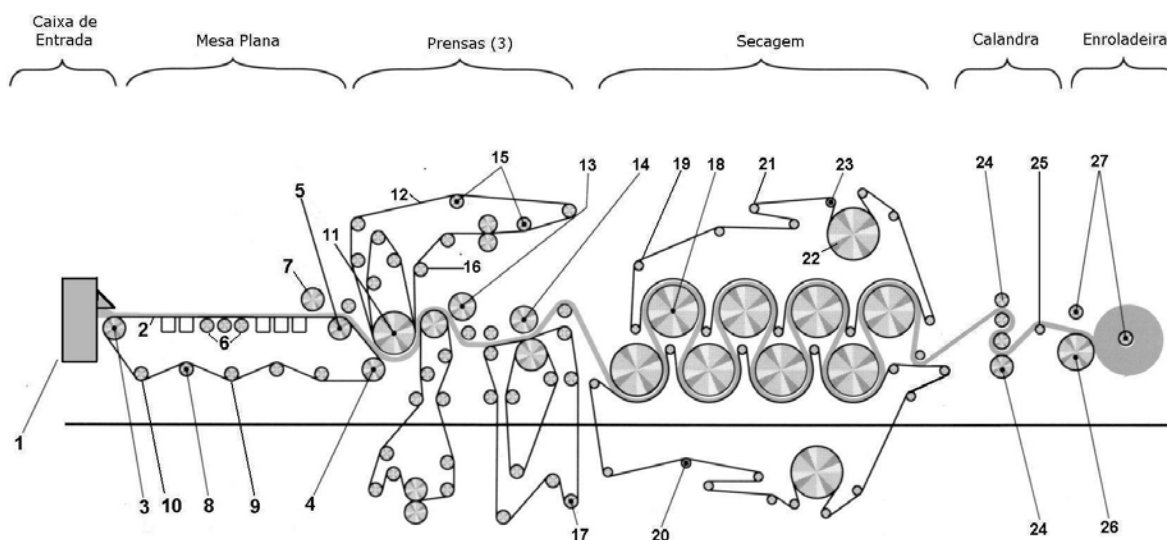
Finalmente, é importante ressaltar que todas essas técnicas estão agora disponíveis para implantação pela indústria papeleira nacional como parte do seu esforço de redução dos custos de produção, visando uma maior participação em um mercado global, cada vez mais competitivo.

Referências:

- (1) Remo Alberto Pierri - "Manutenção Preditiva" - Revista do Negócio Agro Industrial RNA", Ano II - No. 8, 11-12/98.
- (2) Relatório de Prestação de Serviços - 1996 a 1998.

TABELA I

MÁQUINA DE PAPEL - SECÇÕES E COMPONENTES



SECÇÕES	COMPONENTES	TIPO	LEGENDA
ALIMENTAÇÃO	Caixa de Entrada		1
FORMAÇÃO DA FOLHA (Tipo Mesa Plana Ou Fourdiner)	TELA		2
	Rolo Cabeceira		3
	Rolo Acionador		4
	Rolo De Sucção		5
	Roletes Secadores		6
	Rolo Bailarino		7
	Rolos de Tela	Guias	8
		Reguladores	9
		Esticadores	10
PRENSAS ÚMIDAS (3 Estágios)	Rolo Pegador		11
	Feltros		12
	Rolos De Pressão	Granito	13
		Borracha	14
	Rolos De Feltro	Guias	15
		Reguladores	16
		Esticadores	17
SECAGEM	Cilindros Secadores		18
	Rolos De Feltro	Guias	19
		Reguladores	20
		Esticadores	21
		Evacuadores	22
		Sopradores	23
ACABAMENTO	Rolos	de Calandramento	24
ENROLAMENTO	Rolos	Guia Papel	25
		Tambor Tensionador	26
		Bobinador	27

TABELA II

LIMITES DE ALARME PARA ROLOS GUIA DA PARTE ÚMIDA

PARAMETRO (1)	FAIXA DE (2) FREQUÊNCIA	ROLO GUIA		ESTICADOR		REGULADOR	
		AL. C	AL. D	AL. C	AL. D	AL. C	AL. D
0	Nível Global	1,8	4,5	2,8	7,1	4,5	11,2
1	até 1N	1,6	4,1	2,6	6,4	4,0	10,0
2	2N	1,1	2,8	1,8	4,5	2,8	7,1
3	3N a 5N	0,71	1,8	1,1	2,8	1,8	4,5
4	6N a 20N	0,56	1,4	0,7	1,8	1,1	2,8
5	21N a 50N	0,45	1,1	0,56	1,4	0,71	1,8
6	1kHz a 20kHz	0,71	1,4	0,71	1,4	0,71	1,4

(1) Parâmetros 0 a 5 - Velocidade (mm/s RMS) Parâmetro 6 - Aceleração (g Pico)

(2) N = Frequência de Rotação