

Artigo técnico

---

# Melhoria da vida útil de rolamentos em eixos principais e caixas de transmissão de turbinas eólicas



## Autor

**Anthony J. Fierro**  
Engenheiro de Aplicações  
Especializado em Energia Eólica

## Índice de Conteúdo

I. Estado atual: projeto da turbina	3
II. O que está promovendo a mudança?	4
III. Soluções aprimoradas	6
Atualizações de SRB para turbinas existentes	6
Atualização de conversão de TDI para turbinas existentes	7
Projeto TDI e modelagem preditiva	8
Modelagem avançada	10
IV. Conjunto do eixo principal: instalação da turbina em campo	13
Monitoramento e desempenho do TDI	14
Inspeção física e boroscópio	14
Monitoramento do pulso de choque	15
Leituras de temperatura	16
Amostragem e teste de graxa	17
Medidas de deflexão	19
V. Conclusão	21
VI. Referências	21

## Melhoria da vida útil de rolamentos em eixos principais e caixas de transmissão de turbinas eólicas

- A necessidade de turbinas de classe de megawatts (MW) maiores aumentou, mas a ampliação dos projetos de turbinas tradicionais não é a resposta.
- Os operadores de turbinas eólicas podem selecionar SRBs (Rolamento autocompensador de rolos) atualizados para melhorar a vida útil dos rolamentos.
- Outra opção é uma atualização de conversão usando um rolamento de rolos TDI (Cônico interno duplo).

### Resumo

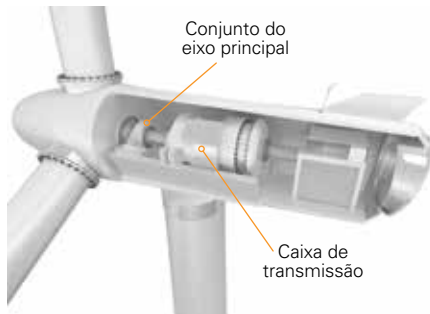
Durante os primórdios do desenvolvimento das turbinas eólicas, as turbinas da classe submegawatt usavam normalmente SRBs (Rolamento autocompensador de rolos) na posição do eixo principal com grande sucesso. À medida que a necessidade de desenvolvimento de turbinas de classe de megawatts (MW) maiores aumentou, o rolamento do eixo principal SRB dos nossos concorrentes foi ampliado em tamanho e design. No entanto, falhas em campo documentadas em SRBs de eixos principais para classe multiMW ressaltaram suas limitações para esta aplicação.

**Com uma cadeia de suprimentos madura de TRBs (Rolamento de rolos cônicos) de furo largo, a tendência do setor é a conversão de SRBs em TRBs em turbinas com mais de 1 MW.** A tabela abaixo destaca as configurações típicas do projeto do eixo principal.

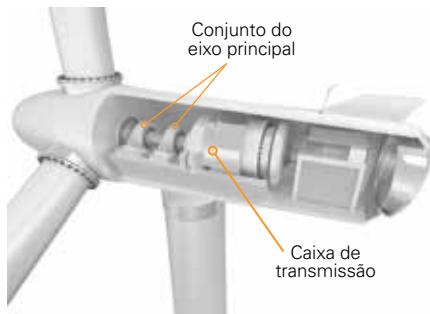
Empresas de projeto:	< 1,5 MW	2 - 5 MW	5 MW+
Vestas	SRB	SRB	2TS
GE Wind	SRB	SRB/TRB	
Gamesa	SRB	SRB	2TS
Enercon	TDI + CRB	TDI + CRB	TDO
Mingyang	SRB	TDO	
Suzlon	SRB	SRB	
Guodian	SRB	SRB	TDO
Siemens	SRB	SRB/TDO	TDO
Acciona (Nordex)	SRB	SRB	
Goldwind	TDI + CRB	TDO	TDO
Dongfang	SRB	2TS	2TS
CSIC	SRB	SRB	TDO
RePower (Senvion)	SRB	SRB	
Alstom Power	2TS	2TS	
Northern Power Systems	TDI + CRB	2TS	
WindTech	2TS		
Romax	TDI + CRB		
Aerodyn	TDO		

Rolamento de rolos cônicos: TS = Cônico único; TDI = Cônico interno duplo; TDO = Cônico externo duplo

Figura 1:



Arranjo de montagem de três pontos no eixo principal



Arranjo de montagem de quatro pontos no eixo principal

### I. Estado atual: projeto da turbina

Conforme medido pelo MW total, os projetos de turbinas eólicas modulares dominam o setor e geralmente usam SRBs para apoiar e carregar as cargas do eixo principal. Classificados como projetos de três e quatro pontos, a Figura 1 ilustra a nomenclatura.

A montagem de três pontos na ilustração à esquerda tem um único apoio de carga dinâmica com um único SRB de 2 carreiras na frente da caixa de transmissão. Existem dois pontos de apoio adicionais localizados nos braços de torque da caixa de transmissão, que produzem três pontos de apoio. As vantagens do arranjo de montagem de três pontos utilizando SRBs incluem:

- Pacote de nacele mais curto com massa reduzida da turbina
- Alta deflexão do sistema e capacidade de desalinhamento
- Cadeia de suprimentos comercialmente madura e econômica

Essas vantagens são compensadas por desvantagens distintas. Por exemplo, durante a carga de empuxo significativo do vento, a carreira a favor do vento (DW) do SRB está totalmente carregada, enquanto a carreira contra o vento (UW) está normalmente descarregada. Quando combinados com um regime de vento sempre dinâmico, o tamanho e a localização da zona de carga mudam com uma transmissão de carga aumentada e não intencional na caixa de transmissão. Devido à RIC (Folga interna radial) exigida dentro do SRB, as deflexões axiais e as cargas de momento são transferidas para os rolamentos de suporte planetário da caixa de transmissão.

Como o SRB se desgasta durante a operação, esta carga adicional afeta os engrenamentos de engrenagens planetárias, as engrenagens planetárias e as cargas de rolamentos. O desempenho dos projetos de SRB único sofreu falhas significativas em campo muito antes da vida projetada de 20 a 25 anos. Essas falhas precoces aumentaram significativamente o reparo em campo e o custo de operação durante a vida útil.

De maneira similar, a montagem de quatro pontos usa dois braços de torque da caixa de transmissão para ajudar a apoiar o eixo principal com dois SRBs de 2 carreiras para o apoio do eixo principal; que produzem quatro pontos de apoio. Normalmente, o SRB flutuante UW transporta predominantemente cargas radiais, enquanto o SRB fixo DW transporta a maior parte da carga de empuxo do vento. Isso representa uma melhoria em relação ao projeto de montagem de três pontos, mas há evidências crescentes de falhas prematuras no local do SRB fixo DW similares ao do projeto de montagem de três pontos.

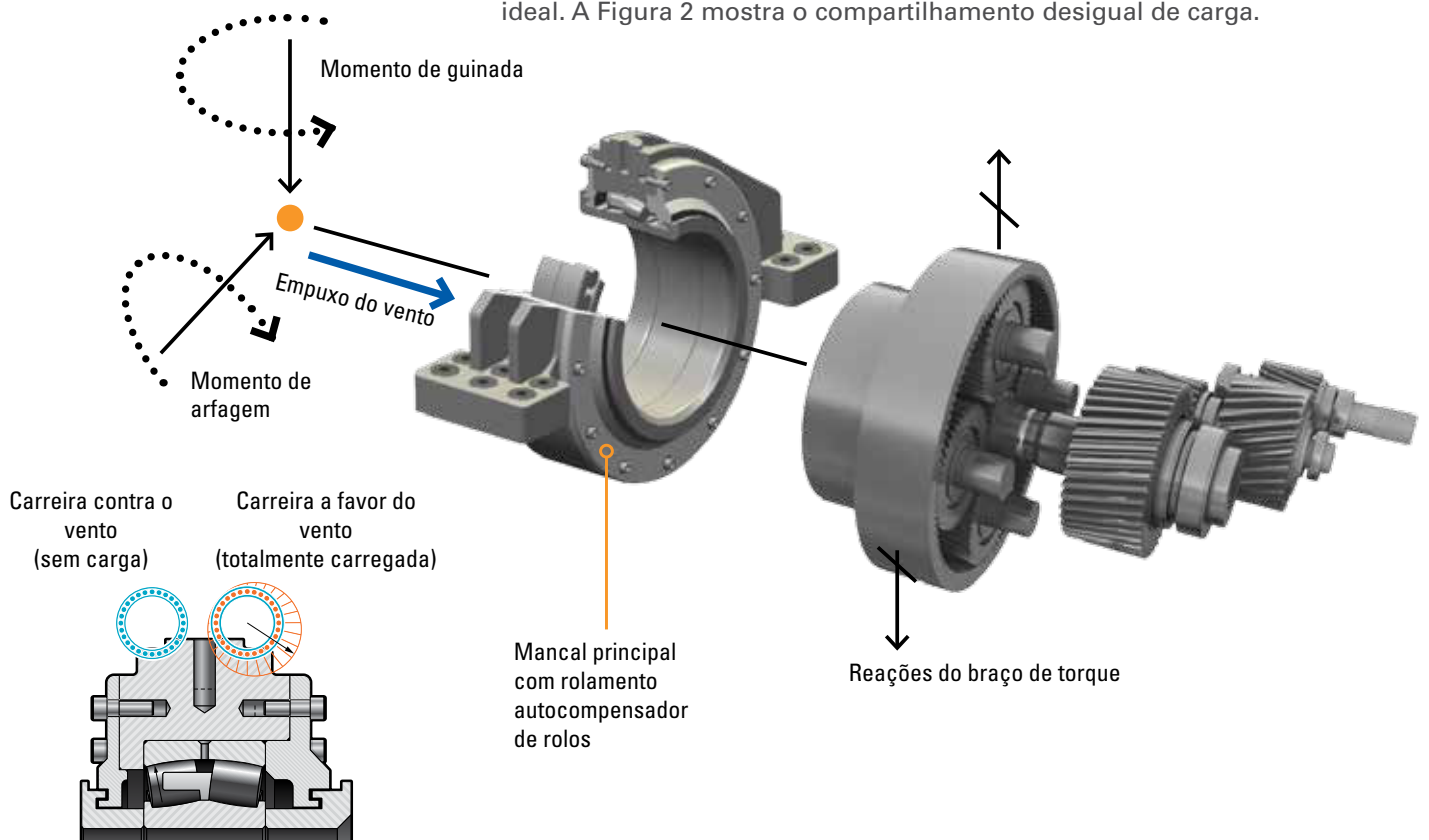
## II. O que está promovendo a mudança?

É amplamente aceito que o uso de um único SRB na posição do eixo principal em turbinas da classe multiMW não é a solução de projeto preferida. O principal fator para uma mudança na filosofia de projeto é a falha prematura dos SRBs visto em operação. A falha que limita o SRB do eixo principal não é uma falha clássica por fadiga, mas principalmente microescamação que leva à fadiga e ao desgaste da superfície.

A combinação de carga dinâmica e RIC resulta nesses SRBs exibindo efeitos de falha de assentamento, distribuição de carga anormal entre carreiras, inclinação de rolos, alta tensão de porta-rolos, geração excessiva de calor, condições de baixo  $\lambda$ , deslizamento de Heathcoat e manchas nos rolos. Um limite máximo oficial não foi estabelecido, mas uma relação convencional entre empuxo permissível e carga radial considerada aceitável para SRB de 2 carreiras é de aproximadamente 25%.

A carga axial na aplicação é muitas vezes significativamente maior que esse limite. Com essas altas cargas axiais, somente a carreira DW suporta carga radial e axial enquanto a carreira UW está completamente descarregada. Este é um contribuidor significativo para a falha por microescamação e resulta em uma condição de operação abaixo do ideal. A Figura 2 mostra o compartilhamento desigual de carga.

**Figura 2:** Cargas aplicadas e compartilhamento desigual de carga



Observações em campo revelam que todas as turbinas de montagem de três pontos estão enfrentando os mesmos modos de falhas comuns, independentemente do fabricante. Embora as falhas levem mais tempo para se desenvolver, muitos arranjos de montagem de quatro pontos estão enfrentando os mesmos modos de falhas. Esses modos de falhas são os mesmos e podem incluir microescamação, carga de borda, empuxo na extremidade do rolo, falhas de porta-rolos de peça única, desgaste do porta-rolos e do anel-guia central e danos por contaminantes. As imagens na Figura 3 abaixo representam falhas reais em campo de uma variedade de modelos de turbina e classe MW. Essas substituições de rolamentos principais não planejadas são caras e têm impacto significativo no desempenho financeiro para o proprietário/operador.



1 MW



1,3 MW



1,5 MW



1,65 MW



2,1 MW



2,3 MW

**Figura 3:** Danos comuns no eixo principal do SRB

Mesmo quando o eixo principal da turbina eólica está equipado com dois SRBs que utilizam uma montagem fixa/flutuante, o movimento axial do eixo principal ainda ocorre devido à folga do rolamento. Um SRB fixo suporta a carga radial e axial do rotor enquanto o SRB flutuante suporta apenas a carga radial. A folga montada desempenha um papel importante no movimento permissível nas direções radial e axial. Minimizar a translação radial é benéfico tanto para o desempenho do rolamento como para o sistema, mas uma folga reduzida do rolamento montado aumenta o risco de uma pré-carga de operação seguida por um descontrole térmico.





### III. Soluções aprimoradas

Estão disponíveis soluções de atualização da Timken para a maioria das turbinas multiMW. Para fabricantes de equipamentos originais (OEM) e clientes de peças de reposição estão disponíveis opções para aumentar a confiabilidade e melhorar o desempenho do sistema. Divididos entre reprojeto de atualização e substituições diretas, as soluções evoluíram de SRBs WR (Resistente ao desgaste) para agora um rolamento de rolos TDI (Cônico interno duplo) Timken® de encaixe.

#### Atualizações de SRB para turbinas existentes

Para um intercâmbio direto com as frotas existentes, a Timken oferece um SRB WR que usa tecnologia de acabamento de superfície combinada com o projeto e a fabricação avançados da Timken. Os rolamentos WR protegem as pistas contra microescamação por reduzir significativamente as tensões de cisalhamento e as interações de aspereza da superfície de contato. A tecnologia de acabamento de superfície é um exclusivo e durável revestimento de carboneto de tungstênio/hidrocarboneto amorfo (WC/aC:H). O revestimento é duas a três vezes mais duro que o aço, com 1 a 2 microns de espessura e apresenta baixo coeficiente de atrito ao deslizar sobre o aço. Nos rolamentos de aço, o revestimento desativa o mecanismo de desgaste adesivo que causa a falha.

Com tecnologias avançadas de acabamento de superfície no rolo, o revestimento ajuda a polir e reparar danos causados por contaminantes nas pistas durante a operação. O acabamento de superfície aprimorado aumenta a espessura efetiva da película de lubrificante e se torna mais eficiente em separar os contatos de aspereza. Essas melhorias reduzem as tensões de cisalhamento que causam desgaste e aumentam as falhas no rolamento. Abaixo, a Tabela 1 mostra um resumo das características e benefícios.

Tecnologia	Descrição	Benefícios
Acabamento do rolo	Acabamento isotrópico de baixa rugosidade	Contato de asperezas e tensão menores
Revestimento do rolo	Revestimento de WC/aC:H 1 µm de espessura	Maior resistência ao desgaste Maior vida útil de fadiga Maior resistência a contaminantes
Geometria interna	Conformidade rolo/IR	Diminui a tensão do rolo, Reduz a inclinação potencial do rolo Cria tração favorável
Porta-rolos bipartido	Porta-rolos de bronze usinado em duas peças sem anel-guia	Diminui as forças de operação possíveis Remove a fonte de geração de contaminantes

Tabela 1: Características e benefícios do SRB WR Timken

O rolamento TDI possui diversas vantagens. Quando os procedimentos cuidadosos de montagem e manutenção abaixo são seguidos, o rolamento pode melhorar significativamente o desempenho do sistema.

Os benefícios incluem:

- Substituição por encaixe para SRB
- Sistema pré-carregado resulta em baixo risco de deslizamento, derrapagem e manchas
- Maior rigidez do sistema
- Torque puro transmitido à caixa de transmissão sem a carga adicional para os braços de torque.

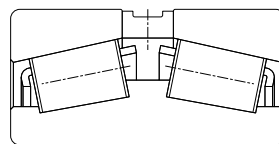
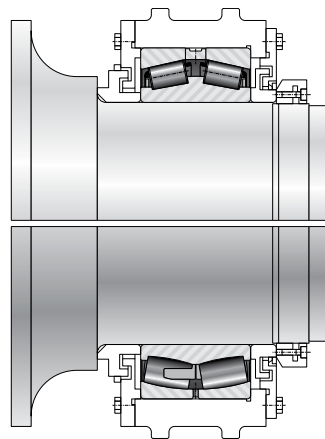


### Atualização de conversão de TDI para turbinas existentes

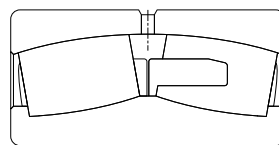
Os benefícios de um rolamento TDI incluem menor desgaste do rolamento, menor deflexão/carga na caixa de transmissão e maior rigidez do sistema. Um projeto de eixo principal TDI pode otimizar o sistema geral do trem de força devido às suas características de projeto e pré-carga. As características do projeto ajudam a garantir excelente estabilidade/rigidez do sistema, compartilhamento de carga entre carreiras e interações previstas entre rolos e pista. Para o caso de reposição de SRB, um único TDI pré-carregado também pode lidar com a combinação de cargas radiais e axiais de uma forma muito melhor do que o SRB.

OTDI é uma excelente escolha para garantir o compartilhamento de carga nas duas carreiras do rolamento, sendo mais flexível em relação ao desalinhamento do sistema do que um projeto TDO (Cônico externo duplo). Com maior capacidade de carga, a pré-carga do rolamento ajuda a mitigar manchas/derrapagens e microescamação. Projetado para um encaixe direto, o TDI usa a caixa de mancal OE existente e eixo sem alterar os ajustes do eixo e do mancal. Representada na Figura 4 abaixo está uma comparação do TDI com o SRB em um mancal idêntico.

#### Rolamento de rolos TDI (Cônico interno duplo)



- Limita o desalinhamento por meio da pré-carga
- Acomoda algum desalinhamento por meio de geometria interna e perfis de rolo
- Absorve o empuxo



- Acomoda algum desalinhamento por meio da folga e da forma
- Transmite o empuxo

#### Rolamento autocompensador de rolos (SRB)

Figura 4: arranjo do rolamento do eixo principal TDI

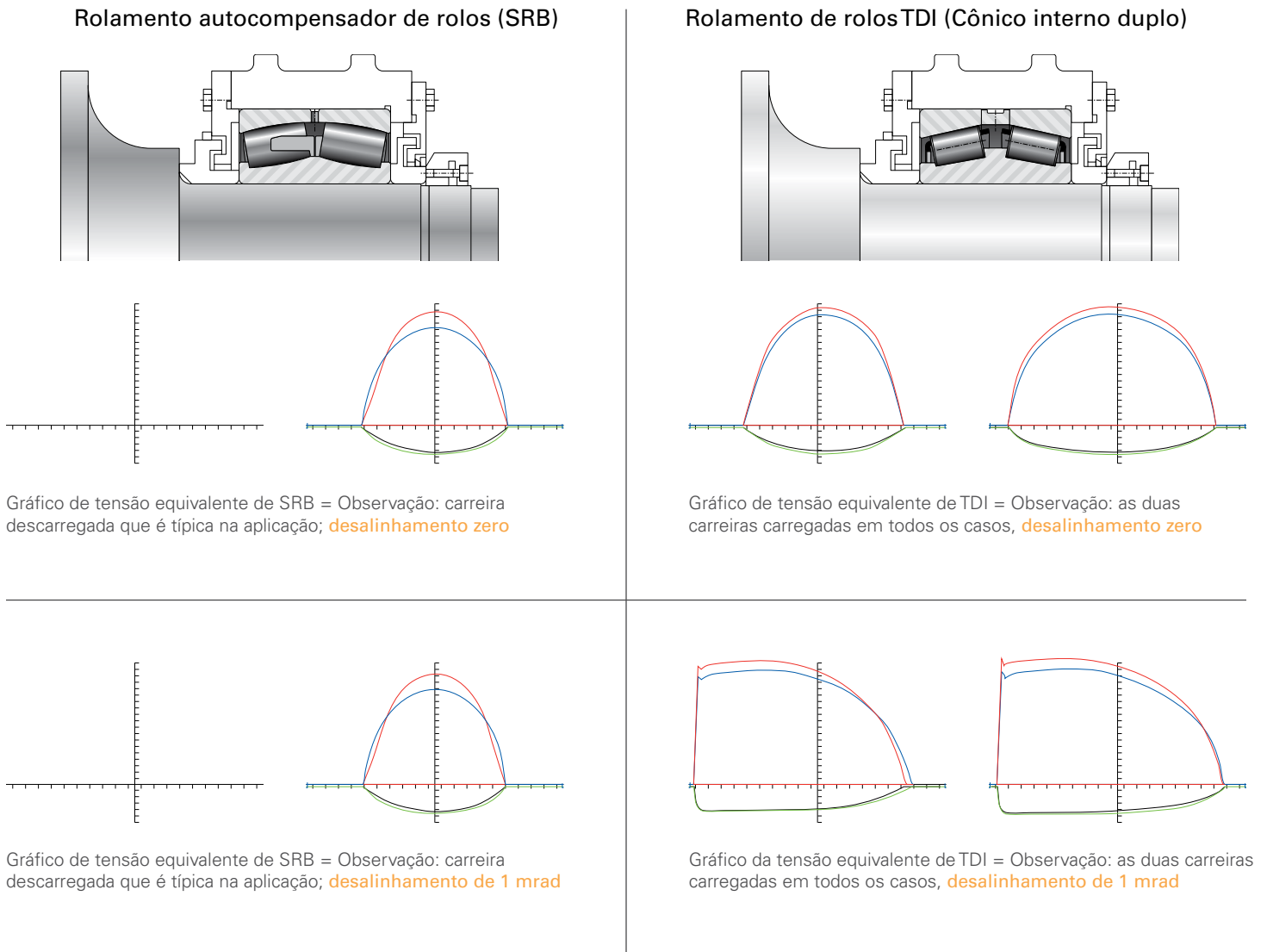
A análise mostra que um sistema de rolamento pré-carregado melhora significativamente o compartilhamento de carga entre as carreiras, reduz o falso brinell e reduz as cargas e deflexões transmitidas à caixa de transmissão. O compartilhamento de carga aprimorado melhora a dinâmica e o desempenho gerais do sistema. O sistema pré-carregado otimizado ajuda a garantir excelente estabilidade do sistema mesmo nas condições de vento mais severas. A geometria interna especialmente projetada controla os perfis de tensão entre rolos e lida com o desalinhamento inicial do sistema inerente a essas configurações de turbina. Em testes de campo no topo da torre, um eixo principal TDI usado em uma configuração de montagem de três pontos de 1,5 MW continua a operar excepcionalmente bem e valida as previsões.

### Projeto TDI e modelagem preditiva

Os critérios de projeto do rolamento incluem uma previsão de 20 anos ou mais de vida útil de fadiga, limites de tensão dinâmica de 1650 MPa, limites de tensão extrema de 4000 MPa e capacidade de lidar com um alto grau de desalinhamento estático e operacional. A ferramenta de modelagem proprietária e avançada da Timken, a Syber, considera a rigidez geral do sistema, o desalinhamento do rolamento imposto inicialmente, bem como o desalinhamento dinâmico para o desenvolvimento do rolamento. Para modelar adequadamente os braços de apoio, a conexão da caixa de transmissão incluiu informações específicas de rigidez para a rigidez axial, radial e de inclinação. As Figuras 5 e 6 demonstram a comparação da zona de carga e compartilhamento de carga ao converter um projeto SRB em um TDI.

**Figura 5:** Casos de carga equivalente:

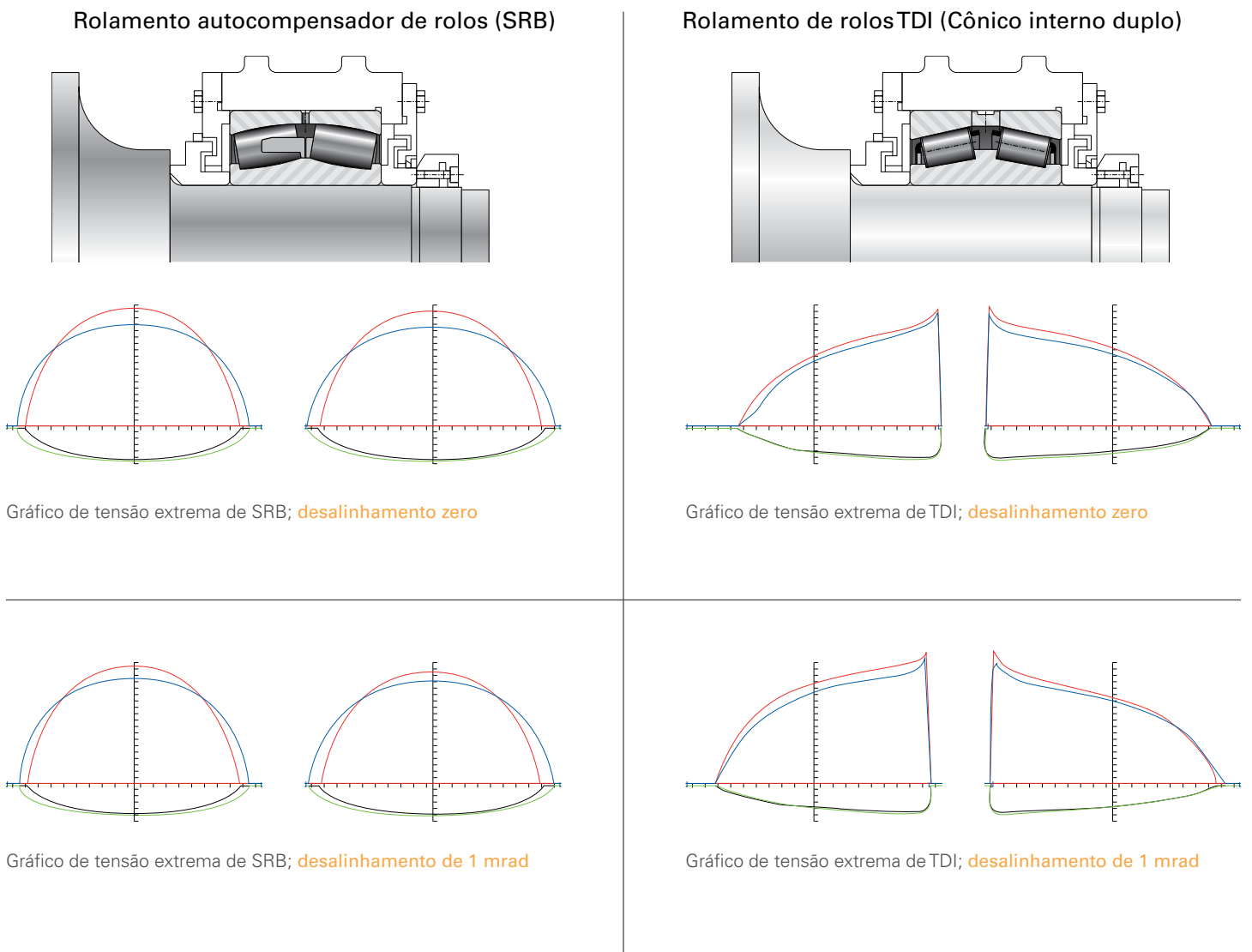
Cálculos da zona de carga para o SRB 240/600 e o TDI NP822933-90WA1:





O rolamento pode se tornar desalinhado facilmente na montagem devido ao acúmulo de tolerâncias do sistema ou à relação coaxial entre a linha de centro do eixo na posição do rolamento e a linha de centro da conexão da caixa de transmissão com o eixo principal. A geometria interna otimizada, combinada com procedimentos adequados de montagem no topo da torre, atenua as preocupações com a montagem. A análise incluiu o deslocamento angular do sistema, bem como o desalinhamento induzido sob fadiga e carga extrema para determinar o impacto no desempenho do rolamento e do sistema.

**Figura 6:** Casos de carga extrema:  
Cálculos da zona de carga para o SRB 240/600 e o TDI NP822933-90WA1:



### Modelagem avançada

Indo além da análise de rolamentos quase estáticos, a modelagem avançada de FE (Elementos finitos) prevê o impacto direcional de alterar os tipos de rolamento. As técnicas de modelagem referem-se à definição de propriedades de materiais elásticos lineares nos modelos sólidos do eixo e do mancal e na definição dos parafusos como elementos de viga pré-tensão ABAQUS. As Figuras 7 e 8 representam a modelagem geral do sistema.



Figura 7: Configuração do modelo FE

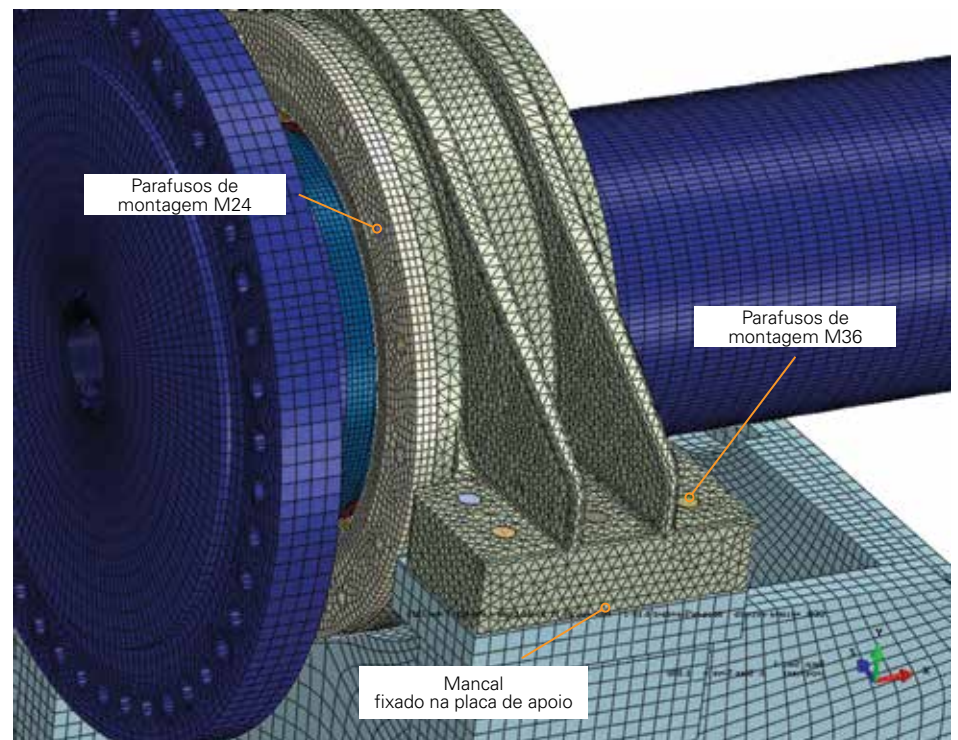


Figura 8: Conexões parafusadas do modelo FE

Analisando os mancais SRB e TDI, a tensão máxima no mancal ocorre no raio inferior do suporte. O local da tensão mais alta no eixo está localizada no raio de concordância do ressalto UW. O suporte da placa de apoio exibe a mais alta tensão na interface entre mancal e a placa de apoio. As Figuras 9 e 10 destacam o local de tensão máxima com a Tabela 2 (próxima página) resumindo os resultados para os casos de carga equivalente e extrema. A Tabela 3 (próxima página) resume a análise de tensão dos parafusos.

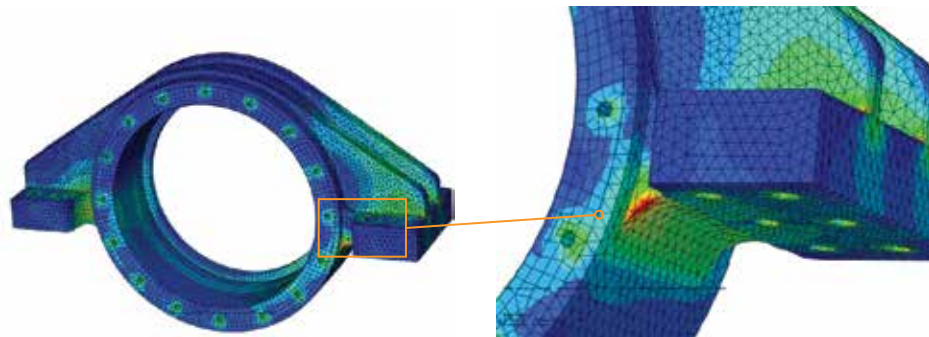


Figura 9: Local da tensão máxima no mancal

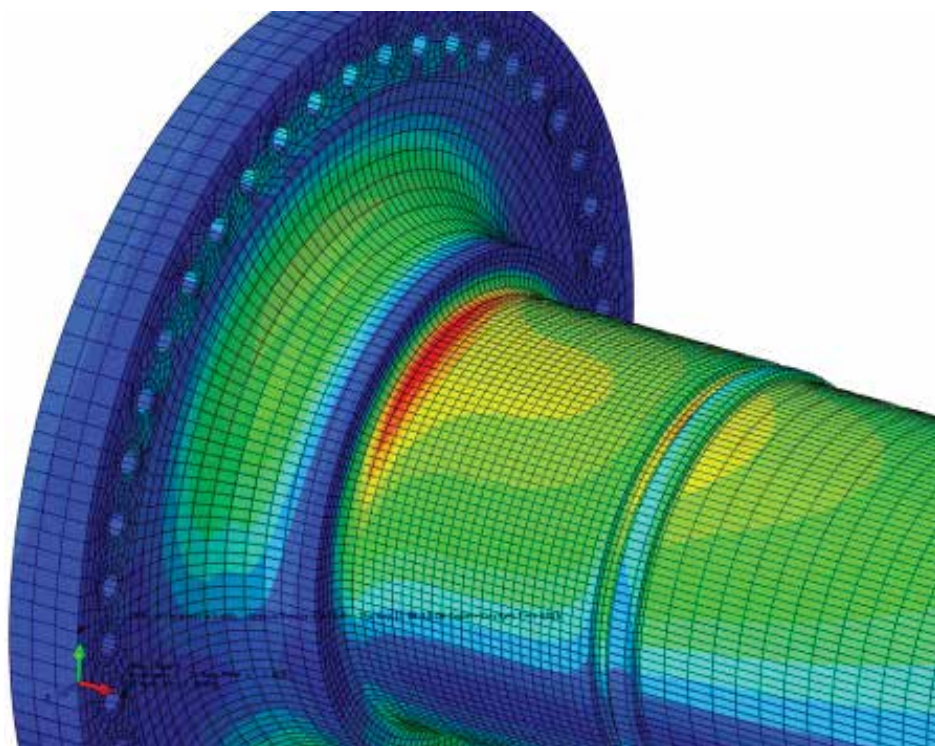


Figura 10: Local da tensão máxima no eixo

Os níveis de tensão e os fatores de segurança indicam um desempenho muito semelhante entre o SRB e o TDI. A FEA (Análise de elementos finitos) previu alterações mínimas nos níveis de tensão em todos os componentes ao comparar os resultados do TDI com os do SRB. Isso mostra que a conversão de um tipo de rolamento para o outro causa um efeito insignificante no sistema.

**Tabela 2:** Resumo de tensão no eixo e tensão no mancal de SRB 240/600 e TDI NP822933-90WA1

	SRB	TDI
<b>Carga equivalente</b>		
Tensão no mancal (MPa)	67	62
<b>Carga extrema</b>		
Tensão no mancal (MPa)	280	326
Tensão no eixo (MPa)	274	259

**Tabela 3:** Resumo da análise de parafusos de mancais SRB 240/600 e TDI NP822933-90WA1

	Conjunto do SRB		Conjunto do TDI	
	Parafusos de fixação M-24	Parafusos de montagem M-36	Parafusos de fixação M-24	Parafusos de montagem M-36
<b>Carga equivalente</b>				
Parafuso com tensão máx. (MPa)	119	96	110	69
Parafuso com tensão mín. (MPa)	100	90	99	62
Vida útil de fadiga (ciclos*)	2.300.000	>1E7	>1E7	>1E7
<b>Carga extrema</b>				
Parafuso com tensão máx. (MPa)	166	83	148	79
Parafuso com tensão mín. (MPa)	100	75	103	66
Vida útil de fadiga (ciclos*)	50.000	>1E7	200.000	>1E7





Figura 13: Interface entre placa de apoio/mancal



Figura 14: Medição do alinhamento do braço de torque



Figura 15: Movimento do conjunto MS



Figura 16: Medição do conjunto MS

#### IV. Conjunto do eixo principal: instalação da turbina em campo

Os engenheiros de serviço da Timken apoiaram a instalação de três protótipos de rolamentos do eixo principal TDI. Essas três instalações ocorreram em 2015. Trabalhando bem próximo ao usuário final em suas instalações de reparo, a engenharia de serviço da Timken liderou a montagem do protótipo do rolamento. Para facilitar a inspeção no topo da torre, as modificações no mancal incluíram orifícios adicionais para o sensor de temperatura e monitoramento de pulso de choque.

Os orifícios para as sondas de temperatura estão localizados na posição 6:00 horas e destinam-se a entrar em contato com a extremidade pequena (seção mais fina) de cada copo. Isso também seria mais próximo da interface entre rolo e encosto. Além disso, um orifício de pulso de choque foi adicionado na posição 9:00 h ao olhar contra o vento. Instruções de montagem detalhadas foram usadas. As Figuras 11 e 12 mostram um rolamento instalado com sucesso.



Figura 11: Instalação de mancal sobre TDI



Figura 12: Conjunto completado

A montagem no topo da torre ocorreu com a assistência contínua da engenharia de serviços da Timken e seguiu os procedimentos desenvolvidos em uníssono com o cliente. Um aspecto importante é garantir que o conjunto do rolamento principal esteja devidamente orientado para a caixa de transmissão antes da instalação final do mancal na placa de apoio. Girar o eixo principal em 360° em cada sentido após a instalação do conjunto, mas antes de instalar as tampas de montagem da caixa de transmissão, permite que o conjunto do mancal se oriente em relação à conexão da caixa de transmissão.

Isto é possível girando o rotor do freio/engrenagem de trava do eixo de saída da caixa de transmissão. Assim que a rotação é completada e o conjunto do mancal é "centralizado", a instalação final dos parafusos de montagem do eixo principal ocorre de acordo com as especificações de torque do fabricante da turbina. O procedimento para montar e alinhar o conjunto do eixo principal no topo da torre é mostrado nas Figuras 13 a 16.

### ***Monitoramento e desempenho do TDI***

Como parte do protocolo de teste, a inspeção frequente no topo da torre incluiu boroscópio, medições de pulso de choque (SPM™ Spectrum), leituras de temperatura, inspeção/amostragem de graxa e monitoramento de deslocamento.

### ***Inspeção física e boroscópio***

A inspeção com boroscópio ocorreu periodicamente de acordo com um cronograma acordado. As imagens de inspeção mostradas nas Figuras 17 a 20 representam a condição dos rolos e pista para tempo de operação de seis meses a um ano. Sem indicações precoces de falhas relacionadas a descascamento, microescamação etc., as imagens mostram a excelente condição de funcionamento do rolamento TDI.



**Figura 17:** Boroscópio da extremidade do rodo da turbina 1



**Figura 18:** Boroscópio da pista/rolo da turbina 1



**Figura 19:** Boroscópio da pista/rolo da turbina 2



**Figura 20:** Boroscópio da pista/rolo da turbina 3



### Monitoramento do pulso de choque

A tecnologia de pulso de choque é uma variante da análise de vibração usando uma técnica de envelopamento adquirida por meio de um transdutor sintonizado. Ela permite o monitoramento da condição de componentes rotativos lentos e é adequada para aplicações de rolamento de eixo principal. Os níveis de pulso de choque também refletem a quantidade de contato metal-metal em um rolamento no que se refere à adesão, microescamação e detecção precoce de descascamento.

Para fornecer uma perspectiva, a Figura 21 representa a medição do pulso de choque de um SRB 240/600 da OE, SRB WR 240/600YMDWEW919 da Timken e TDI NP822933-90WA1, respectivamente. Este gráfico multivariável exibe o nível de pulso de choque significativamente menor do SRB WR. Comparativamente, os rolamentos Timken TDI operam com níveis de pulso de choque mais baixos do que um SRB OE padrão, mas com nível superior ao SRB resistente ao desgaste Timken®. A Figura 21 representa rolamentos com seis meses a um ano de tempo de operação.

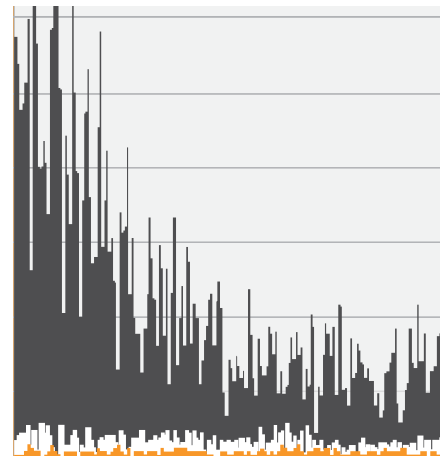
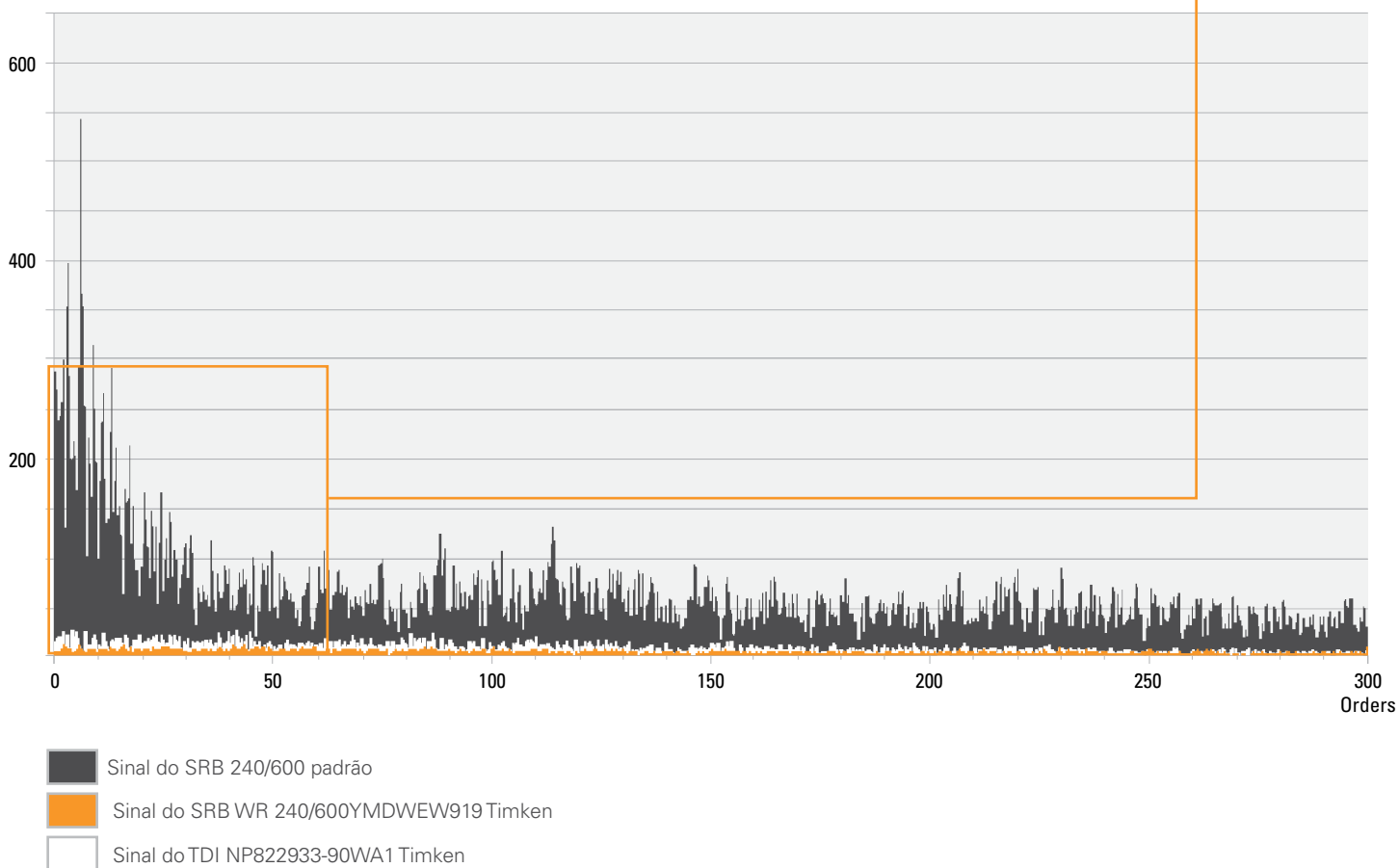


Figura 21: Valores de pulso de choque



### Leituras de temperatura

A temperatura de operação dos rolamentos TDI é comparável a de um SRB OE, conforme mostrado na Figura 22, em que os dados do SRB são originados de uma turbina vizinha e oferecem o melhor ponto de comparação dentro do parque eólico. Dependendo da condição ambiente e das condições de temperatura da nacele, as leituras de temperatura para o TDI variaram de 38 a 46 °C em comparação com 36 a 40 °C para um SRB OE.

Como esperado, o TDI pré-carregado está operando um pouco mais quente, o que é atribuído à pré-carga do rolamento, assim como o fato do local do sensor de temperatura discutido anteriormente estar mais no centro da zona de carga.

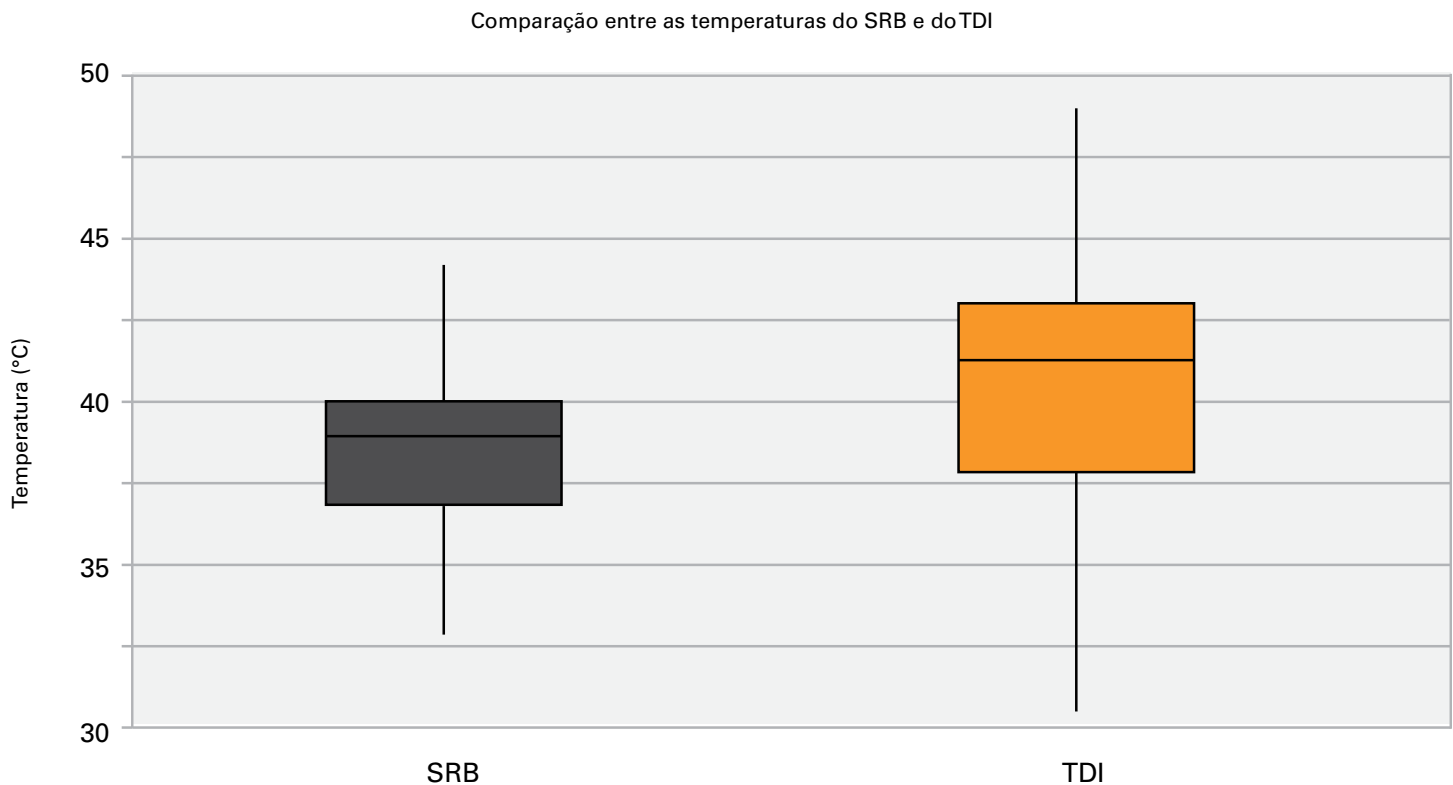


Figura 22: Temperatura do rolamento principal

### Amostragem e teste de graxa

Além das medições e inspeções acima, a amostragem e análise de graxa realizadas em um laboratório independente avaliaram as condições de trabalho da graxa com os resultados mostrados na Figura 23 e na Tabela 4. A análise periódica da graxa incluiu:

1. Composição química (PPM) usando análise ICP conforme a norma ASTM D1976
2. Teor de ferro (PPM) conforme a norma ASTM D7690
3. Penetração trabalhada conforme a norma ASTM D217-10
4. Oxidação da graxa usando espectrometria FTIR (Infravermelho por transformada de Fourier) conforme a norma ASTM E2412-10

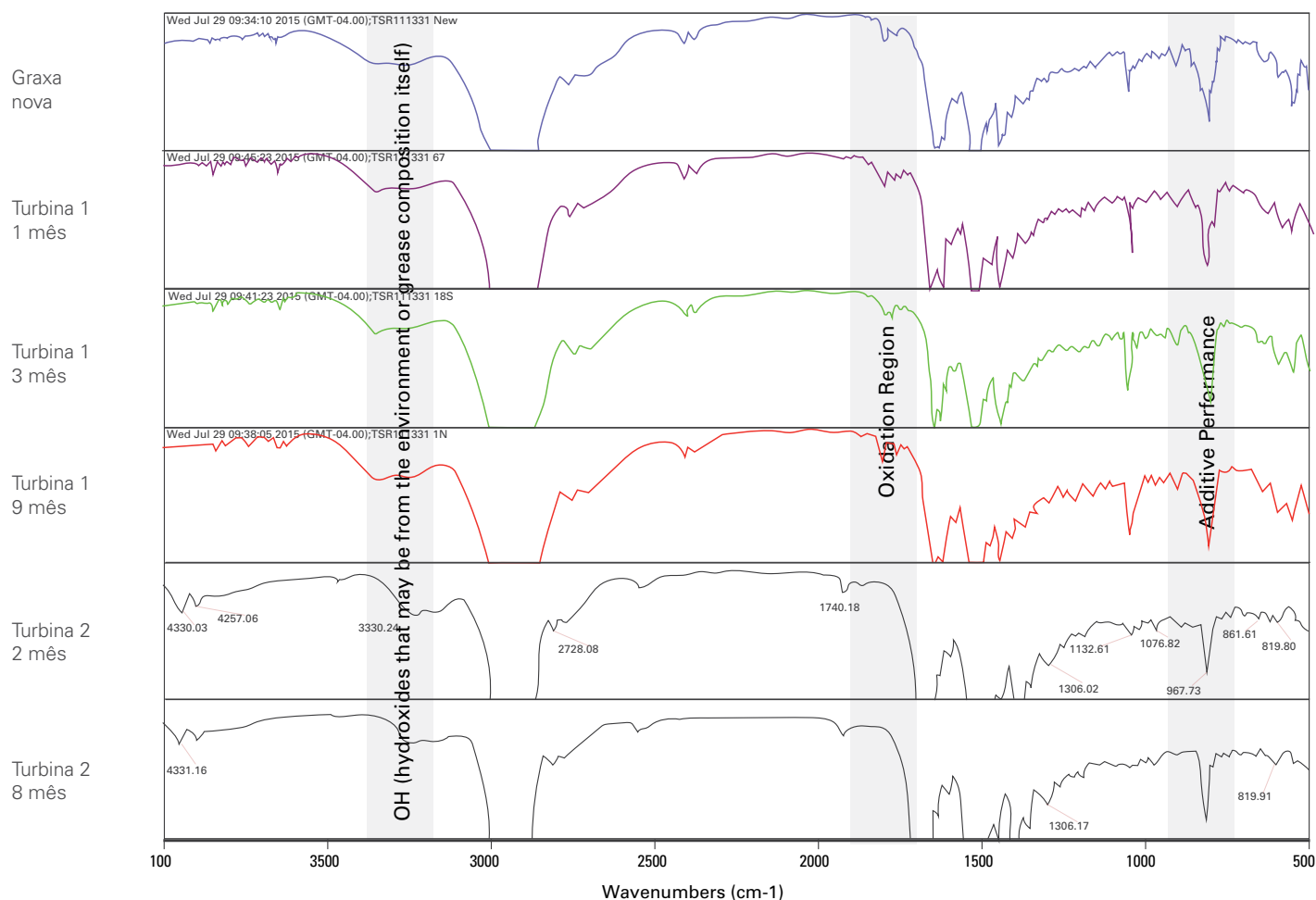


Figura 23: Espectro de FTIR

Tabela 4: Resumo dos resultados da análise da graxa

Amostra ->	Nova	Turbina 1			Turbina 2	
		1 mês	3 meses	9 meses	2 meses	8 meses
Sangria do óleo (%)	5,6	8	8	NA	7	NA
PEN 60x	321	365	365	360	399	360
Classe NLGI	1	0	0	0	00	0
Fe	0	20	15	10	20	40
Ca	62	40	80	200	20	30
P	80	110	110	350	100	110
Zn	700	700	700	700	750	1050
Mo	2500	2500	2500	1300	2700	3400
Li	900	900	900	1000	900	1000

A análise de lubrificação das várias amostras de graxa inclui uma amostra de graxa nova e não mostra nenhuma alteração significativa na composição química. Com o desgaste marginal e a oxidação observados, a graxa parece ter uma leve mudança na penetração, reduzindo a consistência.

A graxa antes do teste é tipicamente 320, mas a graxa de campo teve penetração de 365 a 399; com a penetração após 60 cursos mostrando o intervalo NLGI 1 limítrofe e teste de estabilidade de rolagem limítrofe NLGI 1 a NLGI 0. Em discussões com o cliente, bem como com o fabricante/fornecedor da graxa, a graxa está se comportando conforme esperado. Uma quantidade desejada de sangria e instabilidade de cisalhamento relativa lubrifica adequadamente e protege contra o falso brinell.

A espectrometria FTIR mostra resultados promissores ao comparar os hidróxidos, o desempenho de oxidação e aditivo da graxa nova com os das amostras de graxa da turbina. Para hidróxidos, uma alteração percentual maior que 15% indica uma mudança significativa com os hidróxidos provenientes do ambiente ou da própria composição da graxa.

A região dos aditivos indica a degradação dos vários aditivos com ênfase na comparação de picos; com o esgotamento dos aditivos, os picos diminuiriam. No geral, a análise de FTIR confirma o desempenho aceitável da graxa.

### Medidas de deflexão

Medidas de deslocamento foram feitas diretamente no eixo principal usando sensores montados com uma base magnética diretamente na placa de apoio. Para entender o deslocamento axial do eixo na conexão do rolamento principal e na caixa de transmissão, os resultados na Figura 24 demonstram claramente o deslocamento do TDI sendo aproximadamente um terço do de um SRB.

Diretamente atribuído à folga interna de operação de um SRB em relação à pré-carga montada do TDI, o rolamento cônico pré-carregado minimiza a transmissão de deflexão adicional do eixo para a caixa de transmissão, através dos rolamentos do suporte e para os braços de torque. Em última análise, isso deve resultar em melhor desempenho e confiabilidade da caixa de transmissão.

Gráfico da série temporal do deslocamento axial do eixo principal

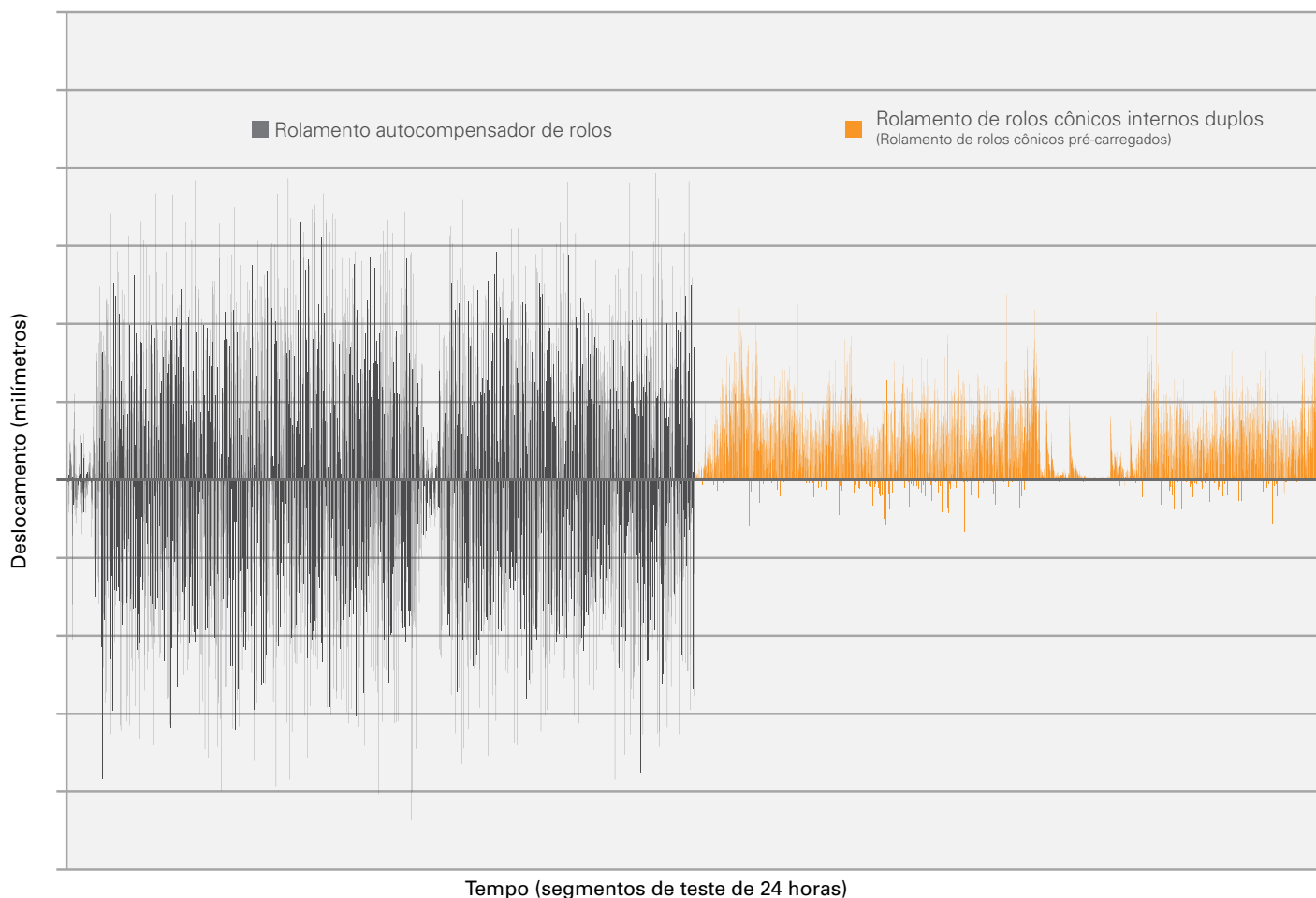


Figura 24: Comparação dos deslocamentos axiais do SRB e do TDI

Um contribuinte direto para a deflexão axial na caixa de transmissão está relacionado à influência do ângulo de contato do rolamento. Com a relação entre a RIC e a AIC (Folga interna axial), os ângulos de contato mais altos resultam em redução da folga axial para uma RIC específica. Com um SRB da série 230 com ângulo de contato menor que o da série 240 com o mesmo furo, a AIC é significativamente maior.

A folga axial típica em um rolamento da série 240 é de aproximadamente 1,3 a 2,0 mm, em comparação com 2,1 a 3,1 mm em um rolamento da série 230. Olhando dentro de uma série específica, um rolamento menor (por exemplo, <600 mm de furo) tem menos folga axial devido ao maior ângulo de contato. O Gráfico 1 destaca influência da folga no ângulo de contato.

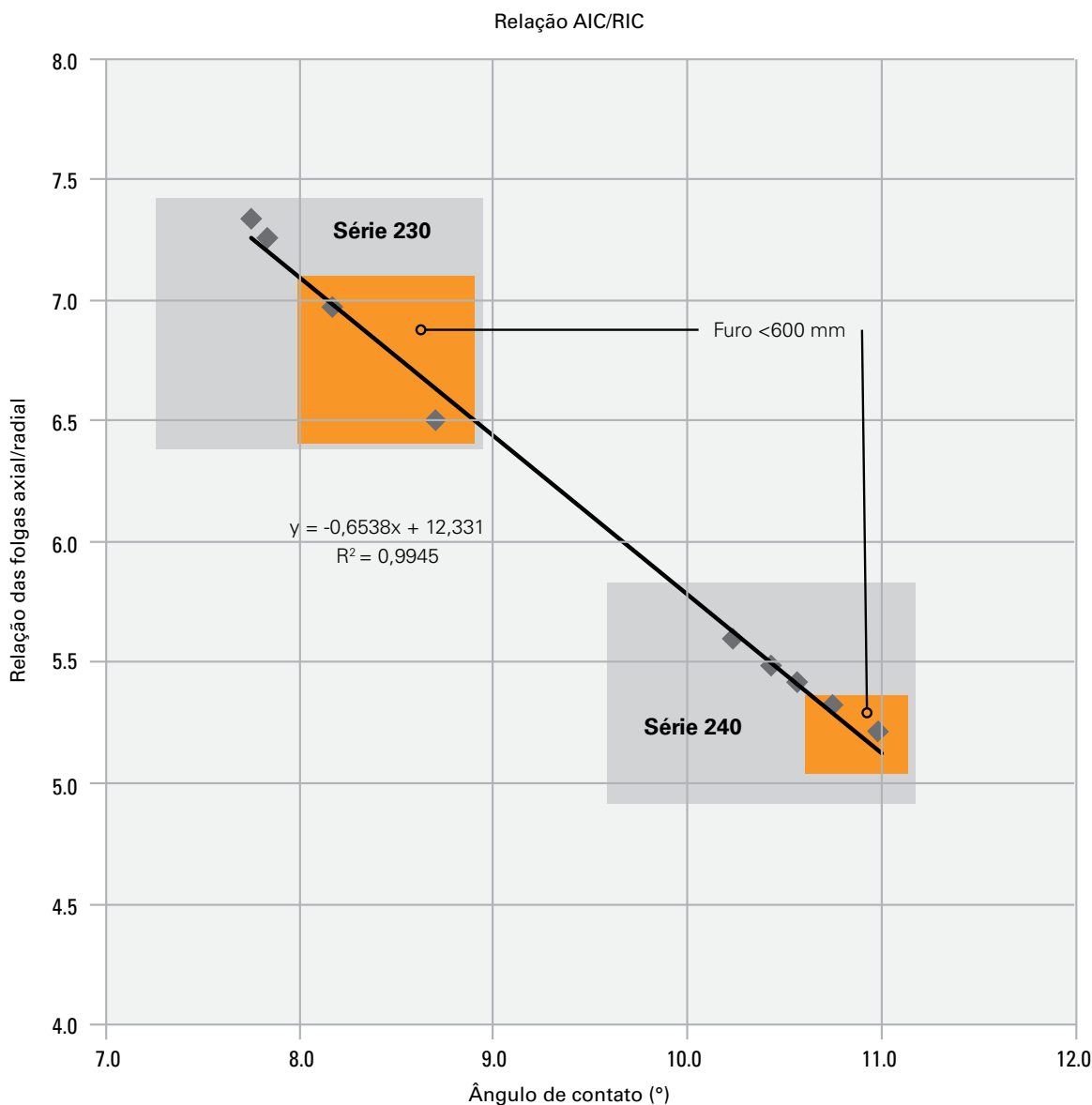


Gráfico 1: Relação entre AIC e RIC para um ângulo de contato específico



## V. Conclusão

Para a sustentabilidade financeira a longo prazo do mercado de turbinas eólicas, a confiabilidade do projeto do eixo principal e da caixa de transmissão deve melhorar. Avanços em engenharia e demanda de mercado direcionaram as atualizações nos últimos anos, utilizando soluções de projeto da Timken para turbinas de montagem de três pontos SRB existentes. O requisito de confiabilidade para turbinas marítimas tem motivado o uso de TRBs pré-carregados. Esta mesma direção de projeto está tomando corpo nos parques eólicos em terra.

Melhorias no projeto do eixo principal aumentarão a confiabilidade de todo o sistema de trens de força e levarão a uma redução no custo total de propriedade. Modernizar o SRB em um arranjo de montagem de três pontos com um TDI pré-carregado especialmente projetado melhora a confiabilidade geral da turbina ao reduzir deslizamentos, derrapagens e manchas, melhorar a rigidez do sistema e reduzir significativamente o movimento axial da caixa de transmissão.

## VI. Referências

1. Badard, G. (2016), "Extending Bearing Life in Wind Turbine Mainshafts", WindTech International, Siteur Publications, Países Baixos.
2. Badard, G. (2016), "Extending Bearing Life in Wind Turbine Mainshafts", Power Engineering, Pen Well Energy Group, Tulsa, OK, EUA.
3. Baldwin, B. (2013), "Increasing Bearing Reliability in Main Shaft Support Systems", Windpower Engineering & Development, WTW Media, Cleveland, Ohio, EUA.
4. Kotzalas, M.N. and G.L. Doll, (2012) "Main Shaft Bearings: Life-Limiting Wear and Solutions", The Timken Company, Canton, OH, EUA.

A equipe da Timken aplica seu conhecimento para melhorar a confiabilidade e o desempenho de máquinas de diferentes mercados em todo o mundo. A empresa desenvolve, fabrica e comercializa componentes mecânicos de alto desempenho, incluindo rolamentos, engrenagens, correias, correntes e produtos e serviços relacionados de transmissão de potência mecânica.

[www.timken.com](http://www.timken.com)