

# UHE Igarapava – Como o monitoramento do entreferro evitou danos de grande monta no gerador

Autores: *Raimundo Jorge Ivo Metzker, CEMIG*  
*Marc R. Bissonnette, VibroSystM*  
*André Tétreault, VibroSystM*  
*Jackson Lin, VibroSystM*

## Introdução

A usina hidrelétrica de Igarapava compreende 5 máquinas tipo bulbo de 42 MW cada e está localizada no Rio Grande, divisa entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, no Brasil. O Proprietário da usina é o Consórcio Igarapava, que congrega cinco Empresas: Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, Companhia Mineira de Metais – CMM, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e Mineração Morro Velho. Os geradores foram projetados e fornecidos pela ABB Brasil e as turbinas pela Voest-Alpine da Áustria.

Estas são as primeiras máquinas tipo bulbo a serem instaladas no Brasil. Por isso, o Proprietário insistiu para que fossem totalmente equipadas com um sistema completo de monitoramento *on-line* que pudesse monitorar diversos parâmetros do gerador para efetivar manutenção baseada nas condições da máquina logo após o comissionamento das unidades. Os parâmetros monitorados foram: entreferro rotor-estator<sup>1</sup>; vibração radial e axial do eixo no gerador e no mancal-guia da turbina; pressão hidráulica; potência do gerador (MW); potência reativa do gerador (MVAR); tensão do gerador; corrente do estator; corrente da excitatriz; temperatura do estator; níveis de água à montante e a jusante; pressão de água à montante e a jusante.

Em Igarapava, o espaço nominal entre rotor-estator é de apenas 11 mm, e portanto o monitoramento do entreferro se torna cada vez mais crítico, especialmente visto que a deformação do estator<sup>2</sup> levando à distorção do entreferro é comum em muitas máquinas tipo bulbo em todo o mundo. Para geradores do tipo bulbo, as máquinas de Igarapava são consideradas de grande porte e o monitoramento do entreferro foi julgado como indispensável.

## Histórico

Em 27 de Julho de 1999, a unidade 2 de Igarapava sofreu roçamento rotor-estator no período de 5 meses após o comissionamento. O fato levou a uma extensa e custosa parada para reparo da unidade. Nesta época, o sistema de monitoramento da máquina, a ser fornecido pela VibroSystM do Canadá, ainda não havia sido instalado. Devido a constrangimentos de projeto, as unidades 1 e 2 não tinham seus sistemas de monitoramento comissionados a tempo para a partida dessas duas unidades. Em função da ocorrência dos danos no rotor-estator, o comissionamento do sistema ZOOM<sup>3</sup> para todas as 5 unidades foi acelerado enquanto, concomitantemente, o Contratante principal estava investigando a causa do contato rotor-estator. Pela perspectiva do Contratante, a Concessionária havia adquirido o sistema de monitoramento especificamente para evitar tal problema. Assim, era mais do que lógico tornar o sistema totalmente operacional o mais rápido possível e utilizá-lo para o objetivo proposto.

Em Setembro de 1999, enquanto estava na usina de Igarapava para completar a instalação do sistema e efetuar o comissionamento nas unidades 1, 2 e 5, a VibroSystM teve a mesma oportunidade de efetuar medições de teste em todas as cinco máquinas. Após revisar as curvas polares e tendências armazenadas no arquivo de dados do sistema, a VibroSystM constatou uma irregularidade na máquina 4 que já havia sido previamente comissionada.

## Problemas no Entreferro Rotor-Estator na Máquina 4

Um total de quatro sensores de entreferro estão instalados no perímetro do núcleo do estator aproximadamente 25 cm (ou 10 polegadas) da borda do ferro do estator. Os sensores estão instalados nos pontos 45°, 135°, 225° e 315° (veja **Figura 1**).

Durante os testes do sistema ZOOM na máquina 4, uma anomalia foi detectada no entreferro rotor-estator na localização do sensor 225°. Baseado nos dados que foram mostrados através do software de monitoramento ZOOM, VibroSystM suspeitou da presença de uma deformação<sup>4</sup> no aro do rotor. Utilizando a capacidade do software do sistema ZOOM de mostrar os dados históricos, foi possível isolar em um ponto no tempo a “assinatura”<sup>5</sup> (i.e. o menor valor de entreferro de cada polo medido em uma revolução completa do rotor) para cada sensor de entreferro.

De modo a facilitar a interpretação dos dados do entreferro, a VibroSystM referencia a medição do entreferro aos pólos do rotor ao invés do tempo. Simplificando, isto significa que um deslocamento de fase é mostrada em três dos quatro sensores de entreferro para alinhar os traços de entreferro de todos os quatros sensores de acordo com seus pólos (para uma explanação detalhada, veja **Apêndice A**).

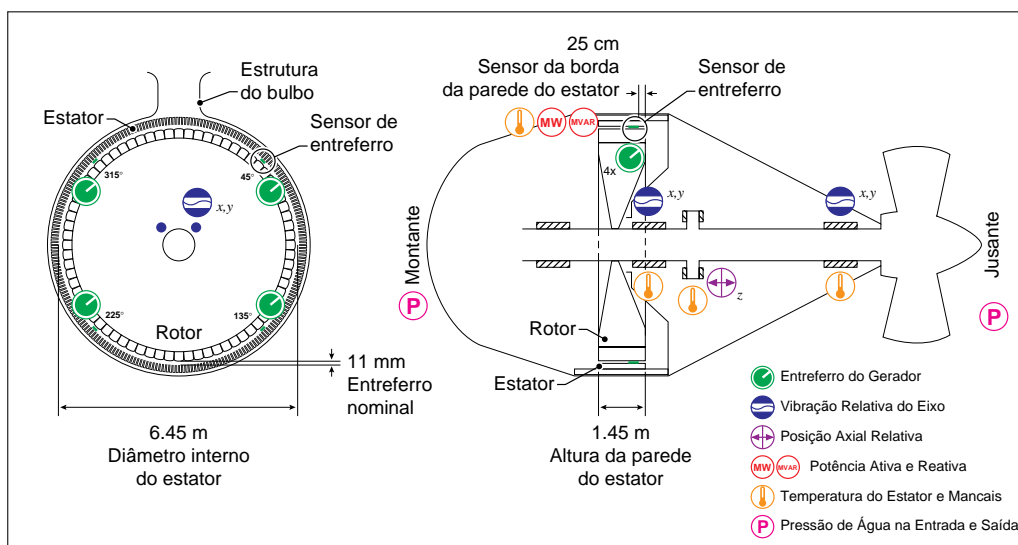


Figura 1: Seção cruzada da unidade tipo bulbo mostrando a localização dos sensores de entreferro na parede do estator e outros parâmetros monitorados.

Isolando a assinatura de cada um dos quatro sensores de entreferro, foi possível identificar se a deformação era permanente ou transitória (veja **Figuras 2 e 3**). Uma deformação permanente resultaria em todos os quatro sensores de entreferro vendo o mesmo traço da assinatura. Uma deformação transitória resultaria em todos os quatro sensores vendo um traço diferente. Utilizando o software ZOOM, foi possível determinar que a amplitude da deformação variou dependendo do ângulo para qual o rotor foi virado. A máxima amplitude da deformação (ou entreferro mais crítico) ocorreu quando polo #39 do rotor passava defronte do sensor 225°.

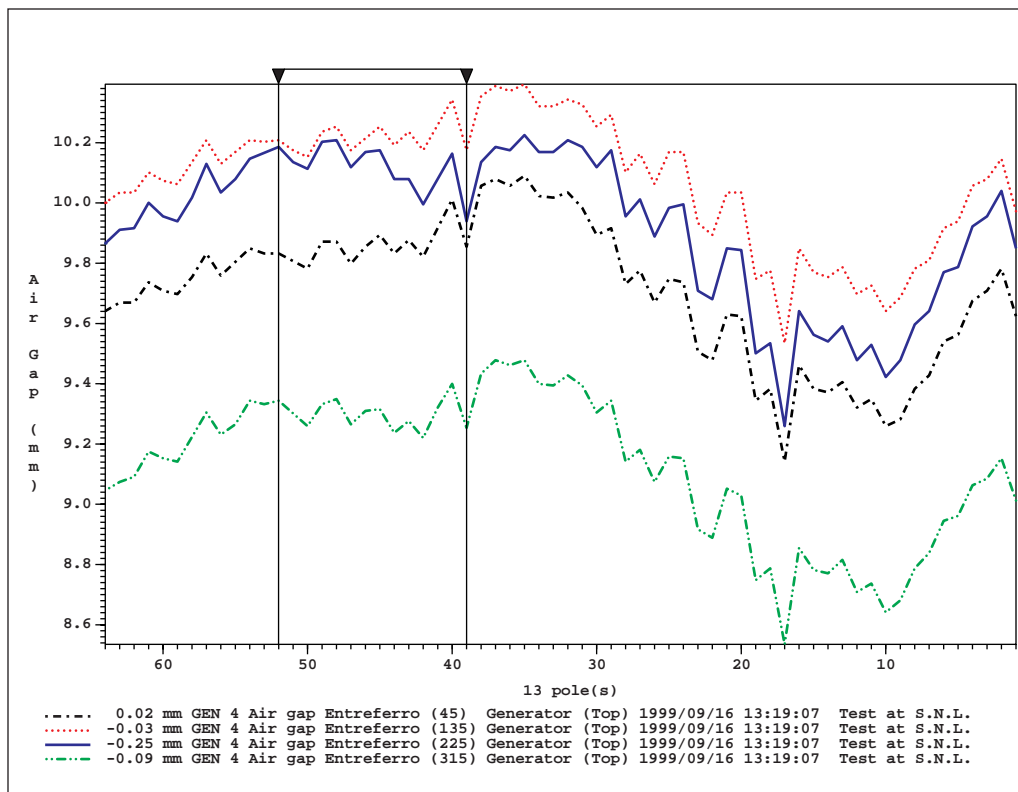


Figura 2: Assinatura do entreferro em todos os quatro sensores mostrando os perfis do rotor em Velocidade Sem Carga (Speed No Load). Em todas as figuras, as marcações em delta indicam variações entre aro do rotor de posição estável (polo 59) e o aro móvel de pior localização (polo 39) ao longo de valores numéricos para cada curva mostrada na parte inferior à direita.

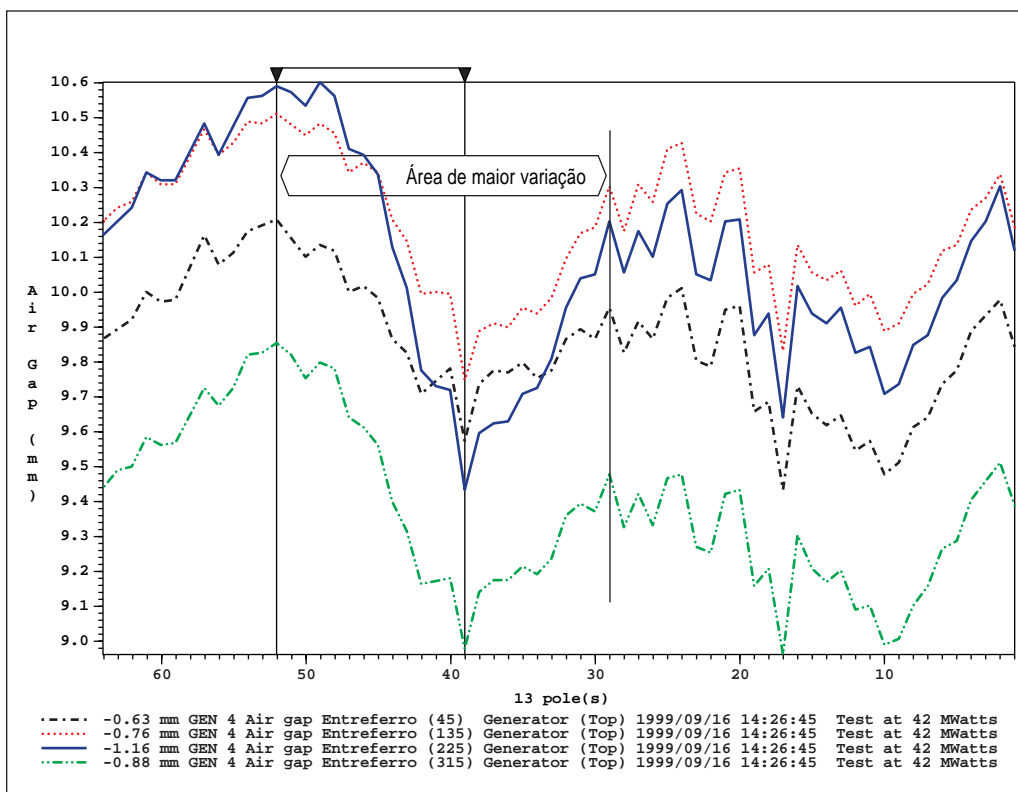


Figura 3: Assinaturas do entreferro em todos os quatro sensores a plena carga (42 MW). Note a dramática variação na forma para o sensor 225° entre os pólos 52 e 29 comparado com outros sensores e com a Figura 2.

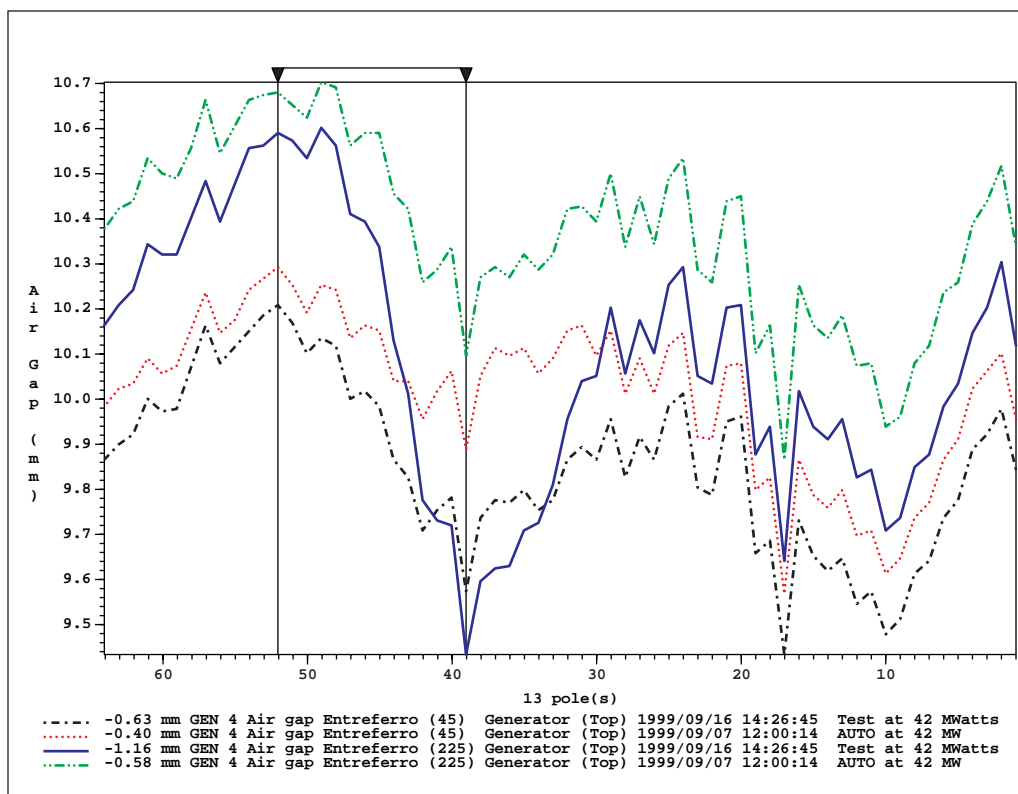


Figura 4: Assinatura do entreferro para sensores opostos a 45° e 225° mostrando a rápida deterioração em um período de 9 dias.

| Sensor | Polo 39 / 42 MW (em mm) |          |           |
|--------|-------------------------|----------|-----------|
|        | 07/07/99                | 16/07/99 | Diferença |
| 45°    | 9.89                    | 9.57     | - 0.32    |
| 135°   | 10.17                   | 9.74     | - 0.43    |
| 225°   | 10.10                   | 9.44     | - 0.66    |
| 315°   | 9.37                    | 8.98     | - 0.39    |

Tabela 1: Diferenças no entreferro para o polo 39 (localização do aro de maior movimento) em um período de 9 dias

VibroSystM plotou os sensores 225° e 45° e os comparou com os mesmo dados da semana anterior. Das assinaturas da **Figura 4** e os dados da **Tabela 1**, fica claro que mesmo no decorrer de uma semana, ocorreu uma significativa deterioração do entreferro. As vistas polares do gerador na **Figura 5** comparam os perfis do aro do rotor entre duas condições de operação (i.e., velocidade sem carga e plena carga) e na **Figura 6** compara os perfis do rotor na carga de 42 MW tomados entre 9 dias (entre 7 e 16 de setembro de 1999).

Estudando os dados, a VibroSystM alertou a CEMIG de que o sistema de monitoramento mostrou que uma falha potencial no entreferro rotor-estator poderia ocorrer a qualquer momento.

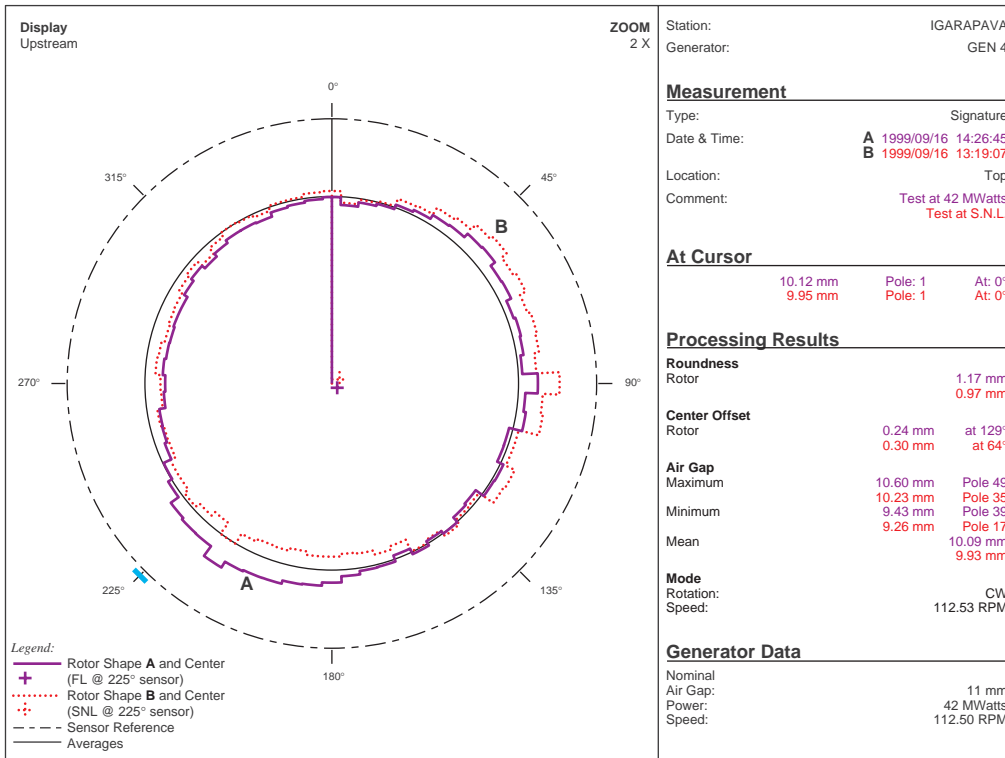


Figura 5: Vista polar do gerador comparando as formas do rotor em velocidade sem carga (B) e plena carga (A) utilizando sensor 225°. Valores numéricos à direita mostram as várias alterações no “offset” da circularidade, ângulo e melhores/piores localizações.

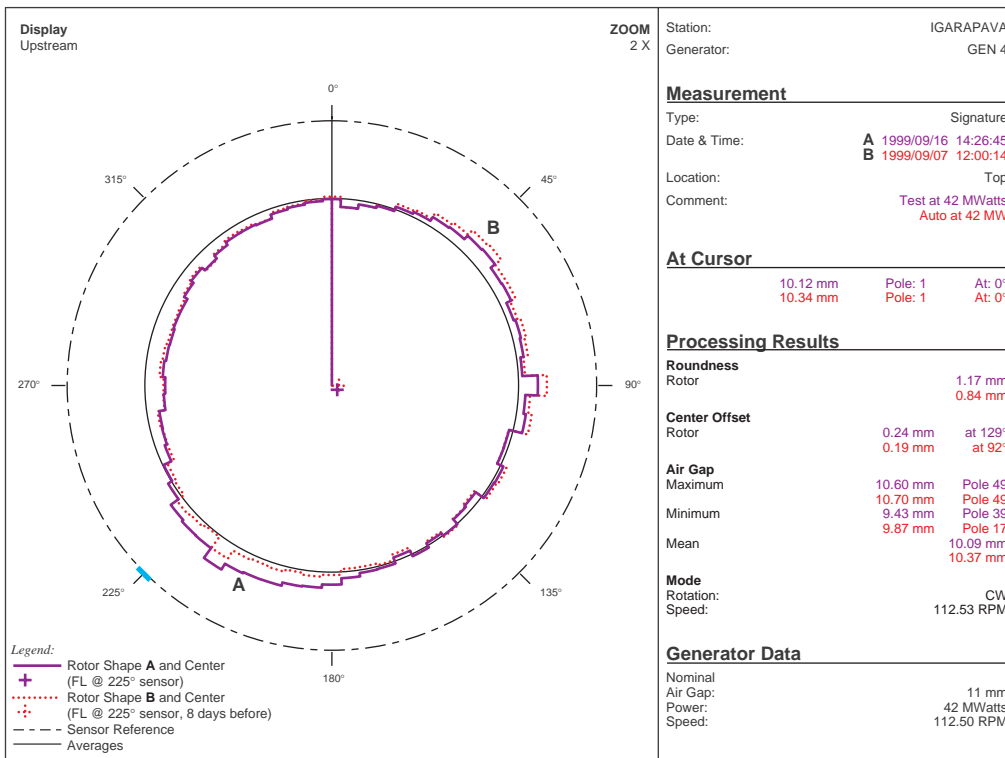


Figura 6: Vista polar do gerador comparando a deterioração na forma do rotor em um período de 9 dias (a plena carga de 42 MW).

## Ações Tomadas

Percebendo a gravidade da situação e o perigo potencial de um contato iminente do entreferro rotor-estator, o Engenheiro de Supervisão da CEMIG contactou imediatamente o Escritório Central da CEMIG. De sua sede em Belo Horizonte, os Engenheiros da CEMIG puderam acessar remotamente as informações via controlador remoto ZOOM e confirmar que o perigo de um contato iminente era real. Os Engenheiros da CEMIG imprimiram os desenhos ZOOM mais relevantes mostrando os resultados e os enviaram via fax para o escritório de projetos do fabricante do gerador. Após estudo adicional, CEMIG tirou a máquina de funcionamento e solicitou ao fabricante ABB que inspecionasse o aro do gerador.

Dois dias após dada a ordem para o desligamento da máquina, o fabricante visitou a planta para conduzir investigações mais detalhadas. Descobriu-se que a máquina 4 estava em condições bem piores que a máquina 2 quando seu rotor roçou o estator. Testes de percussão foram executados nos parafusos de fixação do núcleo do rotor com a aranha. Vários parafusos quebraram durante os testes. Estava evidente que a circularidade do rotor estava perdida e, durante a rotação da máquina, este desbalanceamento estava forçando os parafusos e levando-os a se romperem. CEMIG e o fabricante efetuaram uma revisão detalhada no desenho do gerador de modo a corrigir os problemas e prevenir nova ocorrência.

## Conclusão

Este é um caso típico no qual o monitoramento do entreferro feito pelo sistema ZOOM foi capaz de prever e evitar a tempo um roçamento rotor-estator iminente de modo que ações preventivas pudessem ser tomadas. A CEMIG pôde, nesse caso, concluir pela importância do investimento no sistema ZOOM, que lhe rendeu plenos dividendos e total satisfação. *“Com esse evento, o investimento completo no sistema de monitoramento para toda a planta pagou-se por si só antes mesmo que todas as unidades estivessem comissionadas”*, comentou um dos Engenheiros da CEMIG. Agora CEMIG está monitorando continuamente o entreferro e todas as condições da máquina em todos os cinco geradores de modo a garantir que o investimento do Consórcio Igarapava esteja totalmente protegido. Monitoramento *on-line* (ao contrário do monitoramento periódico, *off-line*) é particularmente útil como nesse caso, que mostrou que mudanças críticas no entreferro podem ocorrer num período de semanas, para as quais a medição periódica, *off-line* é insuficiente para identificar e corrigir um problema antes que se transforme em uma parada forçada com custo muito elevado, seja por danos nas máquinas, seja pelo tempo ocioso das mesmas.

---

<sup>1</sup> Entreferro: espaço livre entre as partes fixas (estator) e girante (rotor) de um gerador ou motor

<sup>2</sup> Deformação do estator: tendência do estator em uma máquina horizontal de ovalar devido à força da gravidade

<sup>3</sup> Sistema ZOOM: abreviação de Zero Outage On-line Monitoring System. É um sistema de monitoramento multi-parâmetros das condições da máquina em funcionamento para geradores e turbinas de hidrelétricas. ZOOM incorpora no sistema básico o AGMS (Air Gap Monitoring System). ZOOM e AGMS são fabricados por VibroSystM / Canadá

<sup>4</sup> Deformação do rotor: área da forma do aro do rotor que se move para fora do círculo normal. É sinônimo de perda de espaço livre e portanto, de entreferro crítico

<sup>5</sup> Assinatura: medição do valor mínimo do entreferro de cada polo do rotor em uma rotação da máquina mostrando o perfil da forma do rotor como vista por cada sensor

# APÊNDICE A

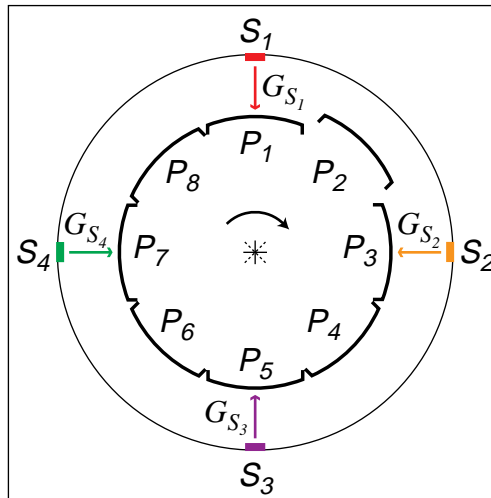
## **Entreferro – Introdução à análise dos resultados**

1. Comparação dos métodos de referência
2. Comparação das formas de gerador

# ENTREFERRO – INTRODUÇÃO À ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 1. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE REFERÊNCIA

Em oposição aos métodos tradicionais de monitoramento referenciados ao tempo, o sistema AGMS da VibroSystM é baseado numa aproximação referenciada ao polo. Sendo o entreferro o menor passo eletromecânico da máquina, o polo serve como referência física por todo o eixo da máquina, permitindo análises rápidas e simples pelos Engenheiros de Manutenção.



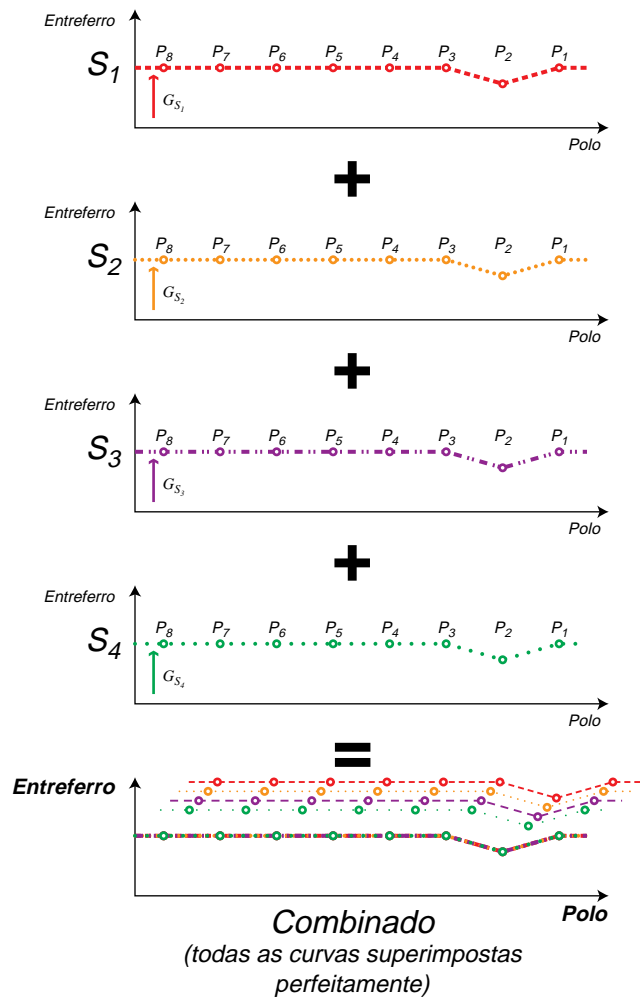
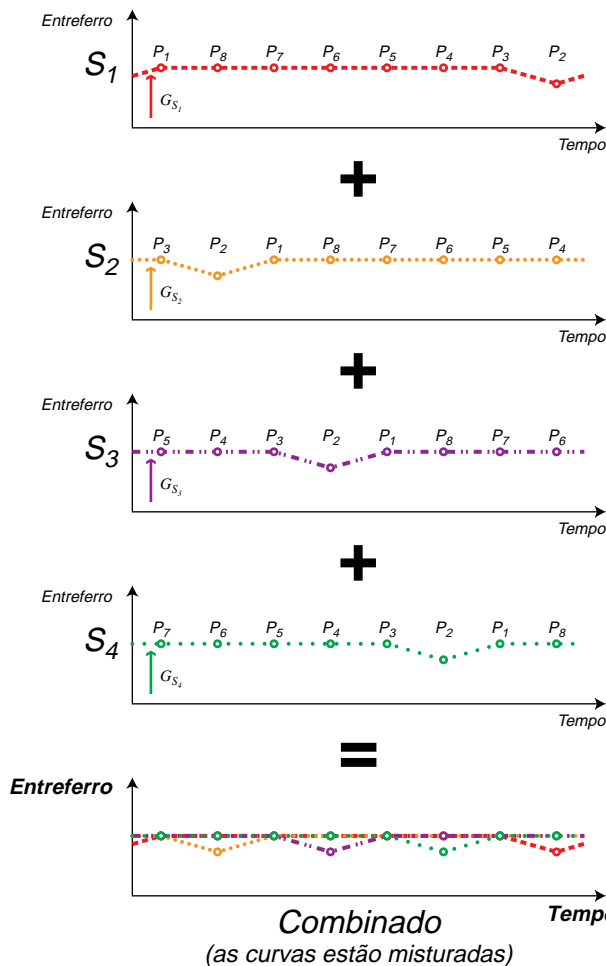
Exemplo:

**Vista superior de um estator perfeito centralizado, com rotor quase perfeito**

(um polo [P<sub>2</sub>] está saliente para ajudar na comparação abaixo)

**Tradicional**  
**Gráfico Referenciado ao Tempo**

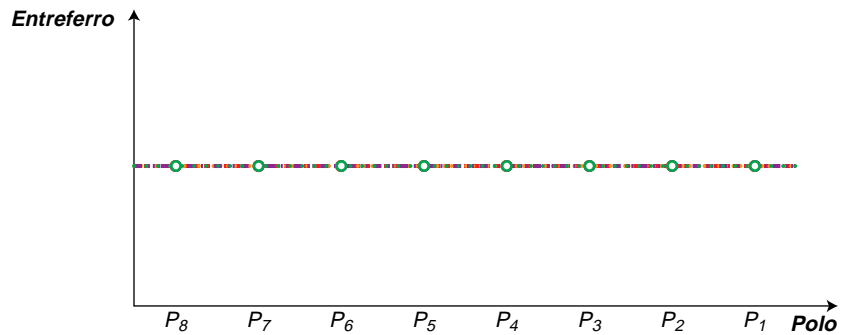
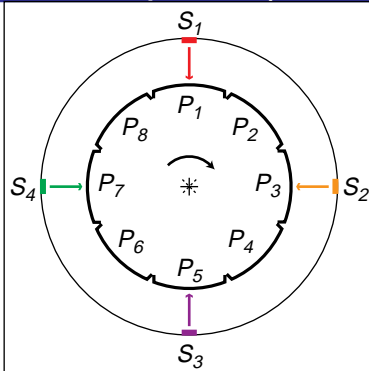
**AGMS**  
**Gráfico Referenciado ao Polo**



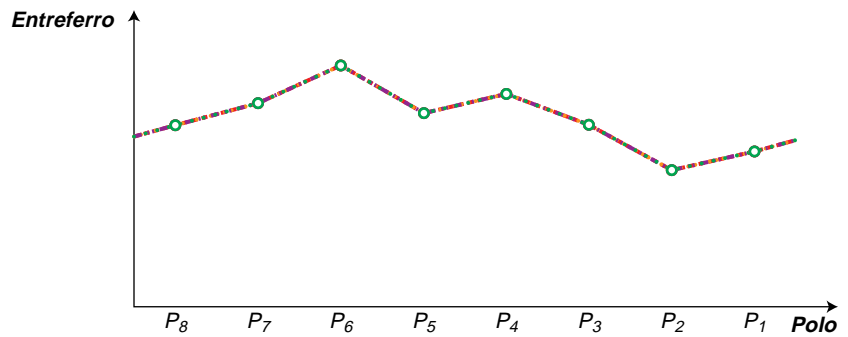
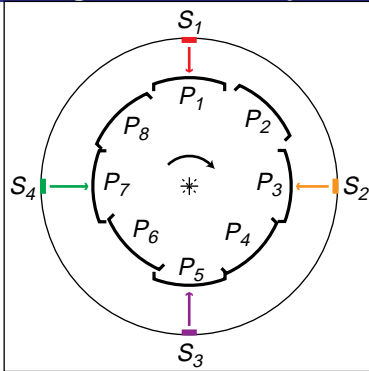
# ENTREFERRO – INTRODUÇÃO À ANÁLISE DOS RESULTADOS

## 2. COMPARAÇÃO DAS FORMAS DO GERADOR

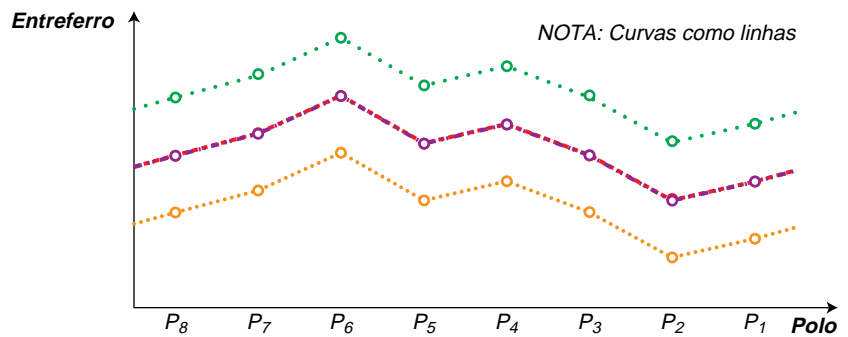
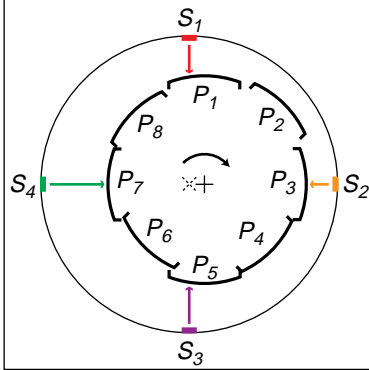
Rotor e estator perfeitos | Centralizado



Rotor irregular em estator perfeito | Centralizado



Rotor irregular em estator perfeito | Não centralizado



Rotor irregular em estator irregular | Não centralizado

