



## BALANCEAMENTO DE ROTORES PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO *FOUR RUN METHOD ACCELERATED* COM APLICAÇÃO EM HIDROGERADOR

**OLIVEIRA NT, Joaquim Pinheiro**

[joaquim.oliveira@eletronorte.gov.br](mailto:joaquim.oliveira@eletronorte.gov.br)

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. - ELETRONORTE

SCN 6 Conj. A, Bloco C, Entrada Norte 2, Asa Norte - CEP 70.716-901 - Brasília/DF, Brasil

**CARVALHO, Mário Olavo Magno**

**de MORAIS, Marcus Vinícius Girão**

[molavom@gmail.com](mailto:molavom@gmail.com)

[mumorais@gmail.com](mailto:mumorais@gmail.com)

Universidade de Brasília - UnB

Depto de Engenharia Mecânica, Grupo de Dinâmica de Sistemas (UnB-FT/EnM/GDS)

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70.910-900 – Brasília, DF

**Abstract.** *Paradas de máquinas equivalem a perdas de produção e faturamento. Rotores exercem funções importantes em plantas industriais. O balanceamento de rotores requer rapidez, precisão e confiabilidade. O “Método Vetorial com Ângulo de Fase” é o mais utilizado comercialmente para balancear rotores rígidos. O “Four Run Method” é menos popular. Ao encarar o balanceamento como uma heurística, utiliza-se os conceitos de Problema Inverso, de Otimização e do Método de Monte Carlo para acelerar o “Four Run Method”, preservando a precisão e confiabilidade inerente a este método.*

**Keywords:** *Four Run Method, Balanceamento de Rotores em 1 plano, Problema Inverso, Método de Monte Carlo, Problema Estocástico, Hidrogerador, Problema de Otimização, Rotor Rígido.*

## 1 INTRODUÇÃO

O balanceamento de massas em rotores é necessário ao bom funcionamento de máquinas rotativas. Plantas industriais, em geral, possuem quantidades significativas de rotores, e alguns deles exercendo funções chaves na produção. O desbalanceamento de massa sobre um rotor aumenta a vibração do sistema na frequência de rotação, predominantemente nas direções radiais. A produtividade das plantas industriais é diretamente impactada pelo funcionamento de seus rotores.

O desbalanceamento não pode ser medido ou calculado diretamente a partir de variáveis conhecidas, pois é um problema inverso. A massa desbalanceada é determinada através da análise dos sinais de vibração medidos do conjunto (Wowk, 2009). Sob este contexto, diversos pesquisadores propõem métodos variados para avaliação do desbalanceamento.

Em campo, o operador deve seguir estritamente as etapas do método de balanceamento adotado sob pena de retrabalho ou danificar a máquina. Frequentemente o campo não oferece as condições ideais. Métodos muito sensíveis podem facilmente falhar caso o operador faça adaptações à sua realidade em campo.

Do ponto de vista de um problema inverso, para determinar as causas do problema precisa-se observar seus efeitos. Os problemas inversos são caracterizados como problemas mal postos, ou seja, possuem mais de uma solução admissível. Assim, restringe-se o número de soluções admissíveis extraindo o máximo de informações do comportamento do sistema.

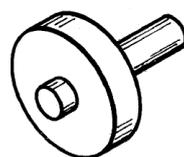
Com uma quantidade de informações inferior ao previsto para o *Four Run Method* visualiza-se o problema de balanceamento de rotores como uma heurística, formulando um problema de otimização baseado nos conceitos do Método de Monte Carlo denominado o novo método como *Four Run Method Accelerated*. Assim, as restrições e informações extraídas sobre o comportamento do sistema, podem ser as modeladas para atenderem as necessidades de um algoritmo de otimização combinatória, buscando encontrar uma boa solução que combine a massa e o local de sua aplicação para balancear o rotor.

## 2 MÉTODOS DE BALANCEAMENTO DE ROTORES RÍGIDOS

Zhou et al. (2001) categoriza os métodos de balanceamento como balanceamento *off-line* e *on-line*. O balanceamento *on-line* é realizado de forma automática em tempo real, seja por dispositivos passivos ou ativos, como a utilização e mancais magnéticos e redistribuição ativa de massas de balanceamento durante a operação do rotor. Dentro da categoria *off-line*, existem métodos diferentes para rotores rígidos e para rotores flexíveis.

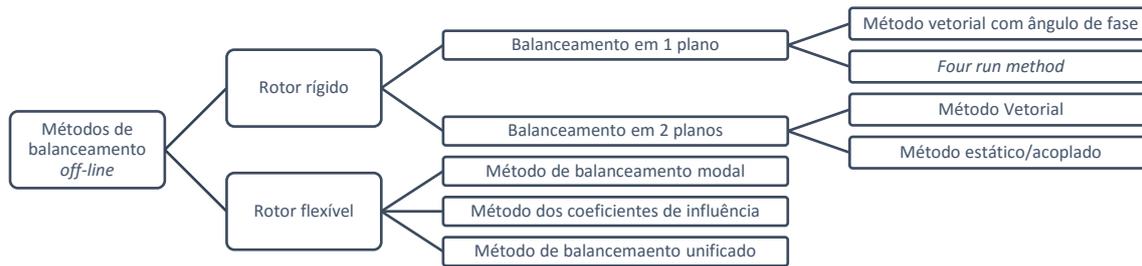
Dentro dos métodos de balanceamento *off-line*, os rotores rígidos podem ser balanceados em 1 ou 2 planos perpendiculares ao eixo.

O balanceamento em 1 plano é aplicado em conjuntos mecânicos que possuem 1 rotor, e este tendo largura inferior ao raio, tais como a maioria dos ventiladores, polias e acoplamentos, vide Fig. 1 (PRÜFTECHNIK LTD, 2002).



**Figura 1. Representação de um rotor cuja largura é inferior ao raio (PRÜFTECHNIK LTD, 2002)**

Zhou et al. (2001) classifica os métodos *off-line* de balanceamento conforme Fig. 2.



**Figura 2. Classificação de métodos de balanceamento *off-line* (Zhou et al., 2001)**

Este artigo adota o balanceamento de rotor rígido em 1 plano para estudo e aplicação do *Four Run Method Accelerated*.

### 3 BALANCEAMENTO DE ROTOR RÍGICO EM 1 PLANO

Correções de desbalanceamento em 01 plano podem ser realizadas pelo *Método Vetorial com Ângulo de Fase*, ou pelo *Four Run Method*, conhecido como Método Gráfico.

O *Método Vetorial com Ângulo de Fase* é amplamente utilizado para balanceamento em campo, pois ele não é influenciado pelo amortecimento, pela movimentação dos locais onde as leituras são realizadas ou pela curvatura inicial do eixo (Rangel Jr., 2008). Este procedimento se inicia com a medição de amplitude e fase de vibração do rotor desbalanceado. Posteriormente, massas de teste previamente conhecidas são adicionadas ao rotor e uma análise de sua nova resposta em vibração é efetuada para determinação da massa de correção necessária e de seu posicionamento angular. Para isso, instala-se um sistema de monitoramento específico capaz de medir o ângulo de fase e a amplitude de vibração do rotor.

O *Four Run Method* é um método gráfico que possui um alto nível de confiabilidade. O Departamento de Pesquisa da Westinghouse Electric & Manufacturing Company usa este método para balancear turbo geradores (Foiles et al., 1998). Para iniciar este método define-se 3 posições angulares diferentes ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ), distantes igualmente do centro do rotor ( $r$ ), onde será acoplada a massa de teste ( $M_T$ ).

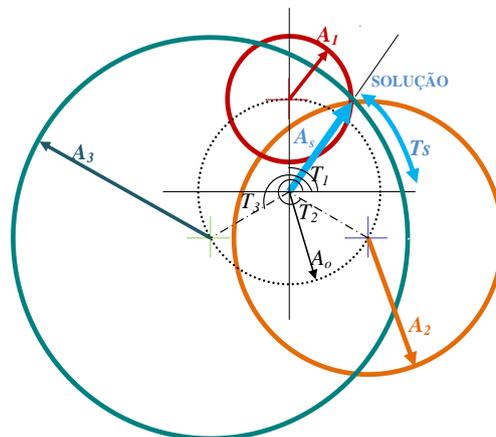
Há na literatura várias formas de estimar a massa de teste (Rangel Jr., 2008 ; Feese & Phillip, 2004 ; Hammes Jr., 2001 ; Foiles et al. 1998), por não haver uma forma consolidada, não é raro em campo valer-se da experiência e o conhecimento do operador sobre a máquina.

Com a massa de teste definida, realiza-se as seguintes medições: Amplitude original de desbalanceamento ( $A_0$ ); Amplitude de desbalanceamento ( $A_1$ ) com a  $M_T$  na posição 1 ( $T_1$ ); Amplitude de desbalanceamento ( $A_2$ ) com a  $M_T$  na posição 2 ( $T_2$ ); Amplitude de desbalanceamento ( $A_3$ ) com a  $M_T$  na posição 3 ( $T_3$ ); Amplitude final com a massa de correção acoplada.

De posse das informações medidas e do posicionamento de cada massa de teste, traça-se um diagrama de círculos (Fig. 3). O círculo central pontilhado possui raio equivalente a amplitude original do desbalanceamento  $A_0$ . Os demais círculos representam as medições com a massa de teste acoplada, eles são centralizados em sua posição  $T$  ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) e possuem raio equivalente a amplitude de vibração medida ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ).

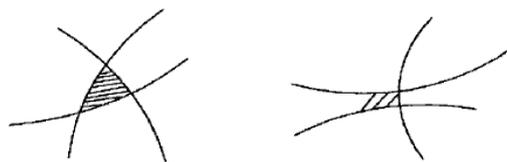
A intersecção entre os 3 círculos representa a solução. A variável  $T_s$  determina o ângulo de acoplamento da massa de correção a uma distância  $r$  do centro do rotor. A massa de correção  $M_S$  é calculada por (Feese et al., 2004):

$$M_S = \frac{A_0 \times M_T}{A_s} \quad (1)$$



**Figura 3. Diagrama solução para o balanceamento pelo *Four Run Method***

Na maioria dos casos estes 3 círculos não interceptam, criando uma área próxima aos pontos de intersecção entre eles (Fig. 4). O problema passa a ser definir o ponto equidistante a estas intersecções, e o operador não teria a segurança necessária para corrigir o desbalanceamento, sendo esta uma grande desvantagem deste método.



**Figura 4. Situações onde os círculos não se interceptam (PRÜFTECHNIK LTD, 2002).**

Esta informação restringiria as possibilidades de soluções do presente problema mal posto de balanceamento. Uma avaliação estocástica deste problema inverso utiliza estas restrições para determinar com precisão a massa balanceada.

## 4 RESOLUÇÃO ESTOCÁSTICA DE PROBLEMAS INVERSOS

Um dos motivos para se discutir o problema de desbalanceamento deve-se ao fato de ser um problema inverso. Woodbury (1995) atribui ao Prof. Oleg Mikailivitch Alifanov, um importante professor no estudo de problemas inversos (PI), a afirmação: “A solução de um problema inverso consiste em determinar causas desconhecidas baseada na observação de seus efeitos”. Em problemas diretos, a solução consiste em encontrar os efeitos baseados na descrição completa das causas (Velho, sem data).

Um PI é matematicamente mal posto, visto que o mesmo problema pode ter várias soluções possíveis. É necessário restringir as possibilidades de solução, extraindo o máximo

de informações viáveis em relação ao comportamento do sistema com o mínimo de trabalho possível, reduzindo as incertezas e erros que podem comprometer o resultado.

Velho (sem data) diz que o PI pode ser resolvido por diversos métodos: inversão direta; decomposição em valores singulares; mínimos quadrados e variantes (mínimos quadrados ponderados); métodos de regularização; métodos variacionais; e outros (molificação, métodos bayesianos, filtros digitais, redes neurais, etc).

Os métodos de regularização consistem na determinação da solução aproximada mais suave compatível com os dados de observação, para certo nível de ruído. A busca da solução mais suave (regular) é uma informação adicional, que transforma o problema mal posto num problema bem posto (Velho, sem data). Na implementação matemática deste método o PI é formulado como um problema de otimização. Problemas assim podem ser resolvidos deterministicamente, estocasticamente ou combinando estes dois métodos.

A resolução estocástica parte do princípio de tentativa e erro, modelando o problema inverso como um problema direto e resolvendo-o diversas vezes por meio de métodos numéricos. A cada resolução, verifica-se o quanto que o último resultado evoluiu em direção ao resultado final, trata-se de um problema de otimização, e progressivamente aperfeiçoa-se a solução para que se aproxime do resultado correto. O resultado intermediário encontrado ( $RI_1$ ) será válido caso ele esteja mais próximo da solução do que o resultado intermediário anterior ( $RI_0$ ), e assim este último é descartado. Caso contrário permanece o resultado intermediário anterior ( $RI_0$ ), e resultado intermediário encontrado ( $RI_1$ ) é descartado, pois ele não aproximou-se da solução.

Para a resolução estocástica, quanto maior a quantidade de informações (sejam das possíveis causas, do sistema em análise ou dos efeitos), maior a capacidade de processamento necessária.

## 5 META-HEURÍSTICA E O MÉTODO DE MONTE CARLO

Cordenonsi (2008) diz que uma heurística é um procedimento algorítmico desenvolvido através de um modelo cognitivo, usualmente através de regras baseadas na experiência dos desenvolvedores. Os métodos heurísticos englobam estratégias, procedimentos e métodos aproximativos com o objetivo de encontrar uma boa solução, mesmo que não seja a ótima, em um tempo computacional razoável, aliando baixo custo a uma solução aceitável para o problema, centralizado no desenvolvimento de algoritmos e técnicas para a resolução de problemas de otimização combinatória.

As pesquisas realizadas ao longo de décadas sobre o desempenho de métodos heurísticos e sobre as características que conduzem ao êxito de tais métodos, levaram à elaboração de estratégias genéricas, esqueletos de algoritmos para a construção de heurísticas. Essas estratégias são chamadas meta-heurísticas (Sucupira, 2004).

Uma meta-heurística clássica é o Método de Monte Carlo, que pode ser descrito como um método estatístico, no qual se utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação. Assim, qualquer cálculo de Monte Carlo é iniciado com a criação de um modelo que representa o sistema real de interesse, como por exemplo uma máquina ou o corpo humano. A partir de então, simulam-se as interações com este modelo por meio de amostragens aleatórias das funções de densidade de probabilidade que caracterizam esse processo físico. À medida que o número de simulações aumenta, melhora-se a qualidade do comportamento médio do sistema, caracterizado pela diminuição das incertezas estatísticas

das grandezas de interesse. Entretanto, este método é qualificado pela impraticabilidade em se obter a solução exata do problema, mas o que se espera é uma boa estimativa do valor exato à medida que um número suficientemente grande de amostragens é processado (Yoriyaz, 2009).

O método torna desnecessário escrever as equações diferenciais que descrevem o comportamento de sistemas complexos. Segundo Nasser (2012), a única exigência é que o sistema físico seja modelado em termos de funções de densidade de distribuição de probabilidade. Uma vez conhecidas essas distribuições, a simulação de Monte Carlo pode proceder fazendo as amostragens aleatórias a partir das mesmas. Este resultado é repetido inúmeras vezes, e o resultado é obtido por técnicas estatísticas sobre um número de realizações que podem chegar a milhões.

Os problemas de otimização são problemas de maximização ou minimização de uma função objetivo de uma ou mais variáveis num determinado domínio, sendo que, geralmente, existe um conjunto de restrições nas variáveis (Holtz, 2005). Para problemas de otimização são necessários:

**Variáveis de projeto.** São aquelas que se alteram durante o processo de otimização, podendo ser contínuas (reais), inteiras ou discretas.

**Restrições.** São funções de igualdade ou desigualdade sobre as variáveis de projeto que descrevem situações de projeto consideradas não desejáveis.

**Espaço de busca.** É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis sobre as variáveis do projeto do problema a ser otimizado, sendo delimitado pelas funções de restrição.

**Função Objetivo.** É a função de uma ou mais variáveis de projeto que se quer otimizar, minimizando-a ou maximizando-a.

**Ponto Ótimo.** É o ponto formado pelas variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições.

**Valor Ótimo.** É o valor da função objetivo no ponto ótimo, que é utilizado como critério de parada do algoritmo.

## **6 CARACTERÍSTICAS DO *FOUR RUN METHOD ACCELERATED***

Baseado em testes e observações, percebeu-se que algumas adaptações ao método clássico *Four Run Method* poderiam antecipar o momento da definição da massa de correção, e reduzir as possibilidades da posição que ela deve ser aplicada.

Este tópico apresenta as adaptações ao método clássico, e como elas atuam para torná-lo mais eficiente, para isso, foram modelados 10 casos distintos para suporte à pesquisa.

### **6.1 Modelagem de Casos**

Os testes e observações foram explicitados em 10 casos hipotéticos de desbalanceamento. Os casos foram definidos como:

**Casos Razoáveis.** Casos modelados com parâmetros que são verificados comumente em campo.

**Casos Extrapolados.** Casos modelados com parâmetros quase irreais. Geralmente são verificados quando há falha na condução do método pelo operador, tal como aplicar uma massa de teste maior que 10x o valor da massa desbalanceada.

Considera-se que as massas de correção e de teste se situam nas extremidades do diâmetro dos rotores. Os dados de cada caso são informações qualitativas quando comparada com os demais casos, ou quando se compara a massa de teste com a desbalanceada. A Tabela 1 detalha as características dos casos modelados.

**Tabela 1. Modelagem de casos para estudo computacional**

Caso	Tipo do caso	Diâmetro rotor ( $[m]$ )	Rotação de operação ( $[rpm]$ )	Característica do desbalanceamento (massas em $[g]$ )
1	Razoável	Grande (2)	Baixa Rotação (650)	Alta massa desbalanceada (100), e massa de teste compatível (80)
2	Razoável	Pequeno (1)	Alta Rotação (3.200)	Pequena massa desbalanceada (20), e massa de teste compatível (12)
3	Extrapolado	Grande (2)	Baixíssima Rotação (100)	Baixíssima massa desbalanceada (1,5), com massa de teste muito grande (20)
4	Extrapolado	Grande (2)	Baixíssima Rotação (100)	Altíssima massa desbalanceada (400), com massa de teste muito pequena (20)
5	Extrapolado	Grande (2)	Altíssima Rotação (10.000)	Baixíssima massa desbalanceada (1,5), com massa de teste muito grande (20)
6	Extrapolado	Grande (2)	Altíssima Rotação (10.000)	Altíssima massa desbalanceada (400), com massa de teste muito pequena (20)
7	Extrapolado	Pequeno (1)	Baixíssima Rotação (100)	Baixíssima massa desbalanceada (1,5), com massa de teste muito grande (20)
8	Extrapolado	Pequeno (1)	Baixíssima Rotação (100)	Altíssima massa desbalanceada (400), com massa de teste muito pequena (20)
9	Extrapolado	Pequeno (1)	Altíssima Rotação (10.000)	Baixíssima massa desbalanceada (1,5), com massa de teste muito grande (20)
10	Extrapolado	Pequeno (1)	Altíssima Rotação (10.000)	Altíssima massa desbalanceada (400), com massa de teste muito pequena (20)

## 6.2 Massa de correção definida após dois giros com a massa de teste

Ao fazer o segundo giro com a massa de teste  $M_T$  deslocada  $180^\circ$  do primeiro, é possível encontrar a massa de balanceamento  $M_S$ , antes de fazer o terceiro giro. Isso se reflete em ganhos, à medida que restará descobrir apenas o ângulo para aplicação desta massa de balanceamento.

Esta afirmação foi obtida por meio de observações e comprovada utilizando os casos 1, 3 e 4, fixando uma posição angular para a massa desbalanceada. Para cada caso, o problema foi resolvido 15 vezes, totalizando 45 resoluções em 284 segundos, uma média de 6,3 segundos por resultado obtido.

**Tabela 2. Definição da massa de correção após dois giros com a massa de teste**

Casos	Ângulo de balanceamento	Resultado esperado [g]	Média dos resultados obtido [g]	Desvio padrão
1	45°	100	99,9482	0,2257
3	170°	1,5	1,5002	0,0007
4	5°	400	335,7853	42,4697

Os casos 1 e 3 alcançou um resultado aceitável. O caso 1 é um caso razoável, enquanto o 3 e 4 são casos extrapolados.

No caso 3 o desvio padrão foi muito baixo pois a massa de teste possui um valor 13 vezes maior que a massa desbalanceada, provocando uma enorme perturbação. Em situações práticas poderia danificar o rotor, mas numericamente o efeito se torna mais evidente e aumenta a confiabilidade da solução.

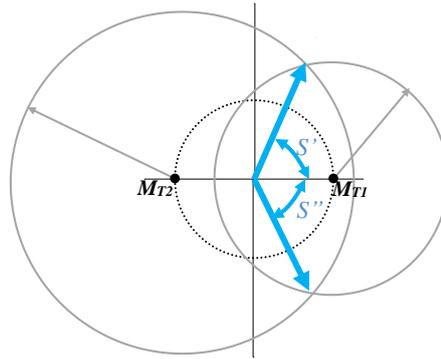
No caso 4 em um rotor de grandes dimensões com uma elevada massa desbalanceada e uma velocidade de rotação muito baixa, tenta-se resolver o problema com uma massa de teste muito pequena, 0,05 vezes a massa desbalanceada. Esta massa de teste não é capaz de perturbar o sistema a ponto de provocar efeitos perceptíveis para resolver o problema. A baixa velocidade de rotação também dificulta, pois reduz a força centrífuga do desbalanceamento. Em campo, o operador descartaria a massa de teste na primeira tentativa e optaria por uma massa de teste mais elevada. Estas considerações serão uteis para entender o indicador de confiabilidade proposto no Tópico 6.5.

A escolha da posição de 170° para o balanceamento do caso 3 e à 5° para o caso 4 foi proposital. O método tem restrições em desbalanceamentos próximos de 0° e 180°, e isto é verificado quando se aplica o algoritmo desenvolvido nos casos extrapolados. O Tópico 6.3 e 9.4 apresentarão o indicador de precisão, que restringe o método em posições de desbalanceamento próximas a 0° e 180°.

### 6.3 Definição da posição de balanceamento após dois giros com a massa de teste

Conforme Tópico 6.2, as massas de testes 1 e 2 estão deslocadas em 180°. Pelo método *Four Run Method*, graficamente os círculos de cada giro se cruzam em dois pontos espelhados em relação ao eixo das coordenadas, posicionados em  $T_s'$  e  $T_s''$ . Estes dois pontos, são as duas possíveis soluções.

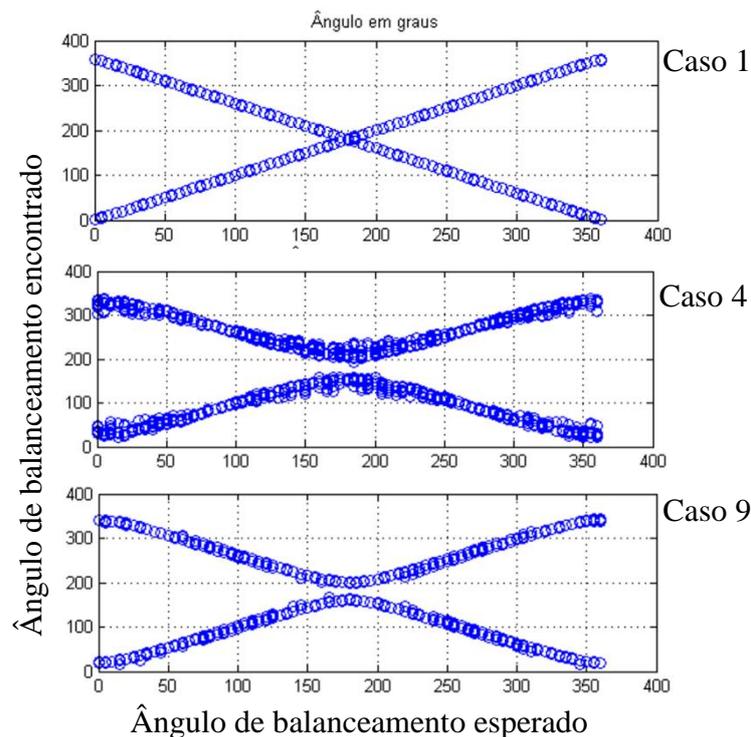
Os giros com as 2 primeiras massas de teste aproxima o problema a duas possíveis soluções, onde apenas uma é a correta. Pela Figura 5 facilmente vê-se que a afirmação é verdadeira, onde  $T_s'' = 360^\circ - T_s'$ .



**Figura 5. Possíveis soluções para o balanceamento pelo *Four Run Method* após os dois giros com as massas de teste deslocadas a 180°**

O algoritmo desenvolvido, por meio de métodos estocásticos, converge para solução única, que pode estar na posição correta ( $T_S$ ) ou espelhada a ela ( $360^\circ - T_S$ ). Ele foi aplicado nos casos de 1 a 10, simulando posições de desbalanceamento, fazendo uma varredura de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  com intervalos de  $5^\circ$ , realizando apenas dois giros com a massa de teste, e para cada posição o problema foi resolvido 15 vezes. Foram coletados 10.950 pontos em 18h 50min 6seg, uma média de 6,2 s por resultado obtido.

Em cada caso foram plotados gráficos entre “Ângulo encontrado” x “Ângulo de balanceamento”, cada um com 1.095 pontos. A Figura 6 ilustra os casos 1, 4 e 9, como exemplo.



**Figura 6. Possíveis ângulos para o balanceamento pelo *Four Run Method* após os dois giros com as massas de teste deslocadas a 180°**

O caso 1 apresentou uma distribuição de soluções conforme esperado, onde o ângulo de balanceamento é igual ou espelhado ao ângulo esperado, em relação ao eixo das coordenadas.

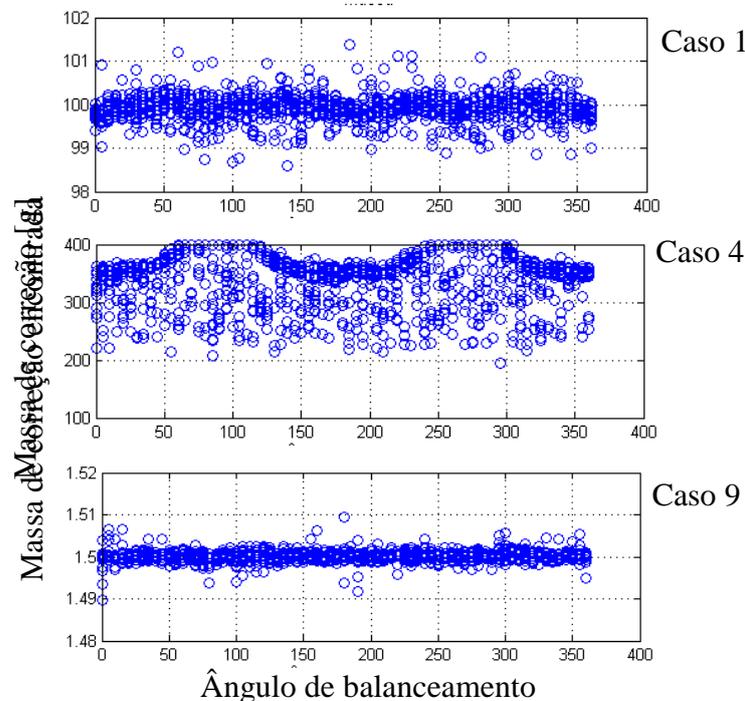
No caso 4, sua baixa rotação produz pouca força centrífuga, mascarando o da força desbalanceada. Ao tentar balancear com uma massa de teste muito pequena, condição

específica para este caso, dificultou a busca da solução pelo algoritmo em regiões próximas a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , mas em regiões distantes destas posições apresentou resultados aceitáveis para diversas aplicações práticas.

O caso 9, também é um caso extrapolado, caracterizado inicialmente por ser um rotor de pequeno diâmetro, que gira em alta velocidade e possui uma massa muito pequena desbalanceada. Estas características iniciais não dificultariam a busca da solução, exceto pelo fato de se utilizar uma massa de teste 13x maior que a massa desbalanceada, o que na prática seria impensável, e levaria a induzir defeitos ou até mesmo falhar o rotor. Esta distorção foi responsável por não encontrar a solução em regiões próximas a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , mas em regiões distantes destas posições apresentou resultados aceitáveis, melhores até que para o 4º caso.

## 6.4 Indicador de precisão

Ao observar os gráficos da Fig. 6 para todos os casos, percebeu-se uma dificuldade na busca da solução para posições desbalanceadas próxima de  $0^\circ$  (ou  $360^\circ$ ) e  $180^\circ$ . Na necessidade de ter informações adicionais para entender o fato, plotou-se as massas de correção correspondentes a cada ângulo de balanceamento encontrado (Fig. 7).



**Figura 7.** Massa de correção do balanceamento pelo *Four Run Method* após os dois giros com as massas de teste deslocadas a  $180^\circ$

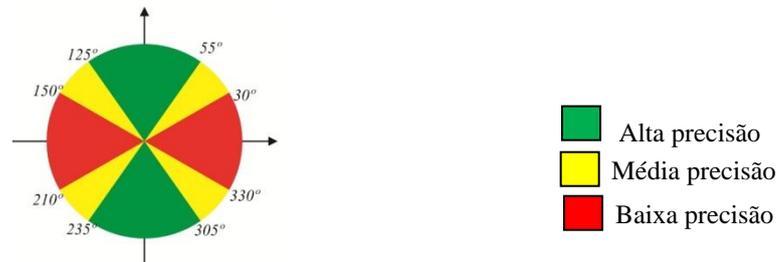
Com tais gráficos, percebe-se que para massas de teste próximas ou muito maior que a massa desbalanceada é possível encontrar um bom valor para a massa de correção, seja qual for a localização do desbalanceamento (casos 1 e 9).

Os casos extrapolados 3, 5, 7 e 9 apesar de apresentarem características próximas da irrealidade, foi imposta uma massa de teste elevadíssima, provocando efeitos sensíveis ao algoritmo e pôde utilizado como uma informação extra.

Ao modelar uma massa desbalanceada muito grande, e utilizar uma massa de teste muito pequena para ensaiar o rotor, não foi possível gerar efeitos sensíveis ao algoritmo para resolução do desbalanceamento, esta é a realidade dos casos 4, 6, 8 e 10. Todos eles

apresentaram uma curva semelhante para a varredura de massas de balanceamento entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ .

Ao observar os dados obtidos para todos os casos, ilustrados nas Fig. 6 e 7, foi possível definir as regiões próximas ao ângulo  $0^\circ$  e  $180^\circ$  que têm dificuldade na busca dos resultados. Esta dificuldade está associada à precisão do resultado, quanto maior ela for, menor é a precisão do valor encontrado (Fig. 8).



**Figura 8. Indicador de precisão do resultado de balanceamento pelo *Four Run Method* após os dois giros com as massas de teste deslocadas a  $180^\circ$**

Cabe ressaltar que o nível de precisão são informações qualitativas. Para cada caso (modelado ou real) os níveis de precisão variam. Para o caso 1 pode-se afirmar dizer que qualquer posição do desbalanceamento é uma região de alta precisão, mas o operador não saberá com qual tipo de caso está lidando.

Em casos onde o operador tiver dificuldades e necessitar de informações adicionais, este diagrama irá auxiliá-lo em tomadas de decisões, seja trocar a massa de teste, refazer o ensaio, ou outro tipo de intervenção.

## 6.5 Indicador de confiabilidade

Os casos razoáveis (1 e 2) podem ter sua otimização comprometida se a massa de teste não for compatível com o sistema que está sendo ensaiado.

Isto foi observado quando se comparou o grupo de casos extrapolados 4, 6, 8 e 10 com o grupo dos casos 3, 5, 7 e 9, onde a relação entre a massa de teste e a desbalanceada são inversas. O primeiro grupo possui massa de teste 13 vezes enquanto o segundo 0,05 vezes da massa desbalanceada.

Adaptando-se os casos 1 e 2, varrendo possíveis massas de teste que variam de  $10^{-3}$  a  $10^3$  em relação a massa desbalanceada, fixando a posição de desbalanceamento num ponto de média precisão ( $45^\circ$ ) e num ponto de baixa precisão ( $10^\circ$ ), no total foram plotados 7.740 pontos para analisar este comportamento. Está ilustrado na Fig. 9 os 1.935 pontos encontrados para o caso 1 com uma massa desbalanceada num ponto de alta incerteza ( $10^\circ$ ).

A *posição da massa de correção* possui valores aceitáveis onde a massa de teste está próxima a de correção ( $0,3 \leq \frac{M_T}{M_S} \leq 3$ ). Enquanto para o *valor da massa de correção*, o intervalo de confiabilidade é mais flexível ( $0,3 \leq \frac{M_T}{M_S} \leq 50$ ). Adotando o intervalo mais conservador, se define que o resultado é confiável quando a relação da Eq. (2) abaixo é atendida.

$$0,3 \leq \frac{M_T}{M_S} \leq 3. \tag{2}$$

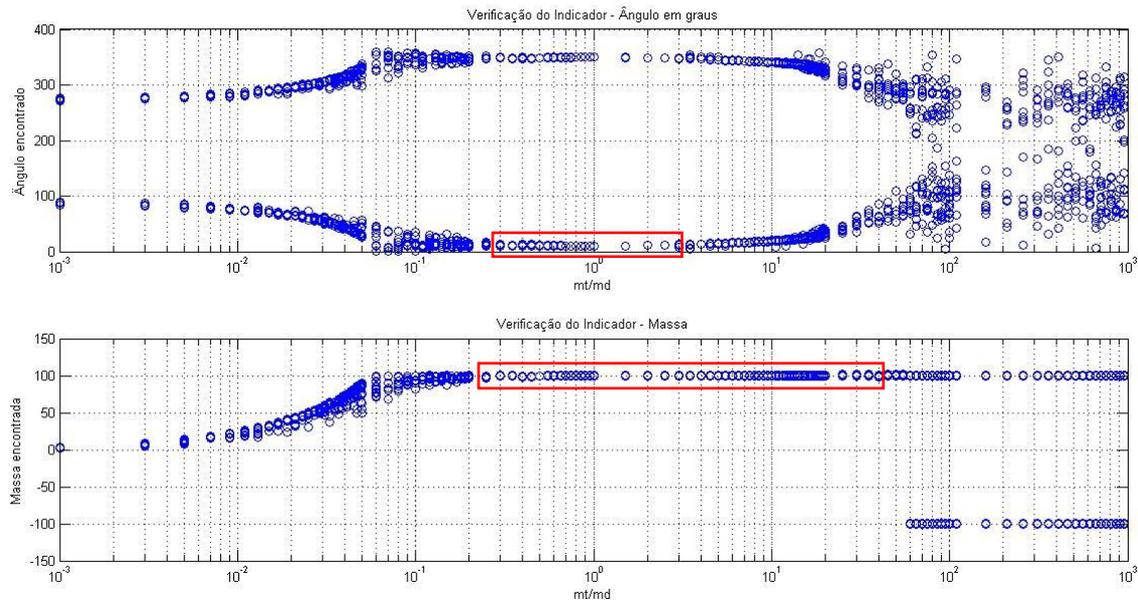


Figura 9. Varredura da massa de teste com  $10^{-3}$  a  $10^3$  vezes o valor da massa de desbalanceamento para o Caso 1 com  $10^\circ$  na fase de desbalanceamento

## 7 FOUR RUN METHOD ACCELERATED

É possível chegar com precisão ao valor da massa de balanceamento  $M_S$  apenas realizando 2 giros com a massa de testes, o primeiro a  $0^\circ$  e outro a  $180^\circ$ . Neste ponto, além da massa de balanceamento  $M_S$ , são apresentadas duas possíveis soluções para o ângulo de balanceamento  $T_S$  e  $360^\circ - T_S$ , onde apenas uma está correta, e o operador deverá optar qual vai experimentar como solução para o problema.

Caso o resultado para a posição de balanceamento  $T_S$  encontrada com os dois primeiros giros situar-se numa região de média ou baixa precisão (Fig. 8), o resultado será avaliado segundo o indicador de confiabilidade (Eq. 2). Em sendo confiável, o operador adotará o resultado encontrado  $M_S$  e optará entre  $T_S$  ou  $360^\circ - T_S$  para acoplar a massa de correção.

Mesmo estando numa região de baixa precisão, se a relação entre a massa de teste e a massa desbalanceada for próxima, o resultado é considerado confiável. Neste passo, caso o operador acerte a escolha para o ângulo de balanceamento ele finaliza o trabalho, do contrário ele terá que desacoplar a massa de correção e reacoplar na posição correta.

Caso o resultado não tenha a confiabilidade necessária, o operador terá que aplicar a terceira massa de teste em  $90^\circ$ . Assim, terá todas as informações necessárias para se dar entrada no método clássico *Four Run Method* apresentadas no Tópico 3 ( $A_0, A_1, T_1, A_2, T_2, A_3$  e  $T_3$ ), definindo com segurança o resultado final  $M_S$  e  $T_S$ .

### 7.1 Fluxograma do *Four Run Method Accelerated*

O *Four Run Method Accelerated* foi modelado para trazer mais rapidez ao *Four Run Method*, possibilitando que com apenas 2 giros com a massa de teste é possível resolver a maioria dos casos.

A Figura 10 apresenta o fluxograma do método proposto, mostrando 5 caminhos possíveis para conduzir o operador durante a aplicação do método. Ficará claro que os

caminhos 1, 2, 3 e 4 dispensam a utilização de uma 3ª massa de teste e têm maior probabilidade de ocorrerem.

Ao adotar uma massa de teste coerente (Eq. 2) o método informa duas possibilidades para solução, onde uma delas é a correta (caminhos 1, 2, 3 e 4). O operador pode valer de sua experiência para analisar outros fatores e identificar o ponto pesado entre as duas opções possíveis. Assim ele resolve o problema com 1 giro a menos que o método clássico. Caso não adote uma massa de teste coerente, mas  $T_S$  esteja numa região de alta precisão ( $55^\circ \leq T_S \leq 125^\circ$  ou  $235^\circ \leq T_S \leq 305^\circ$  conforme Fig. 10), ainda assim não será necessária o terceiro giro com a massa de teste (caminhos 1 e 2).

É remota a possibilidade de realização do 3º giro com a massa de teste, representada pelo caminho 5, pois além da posição do balanceamento resultar numa região de média ou baixa precisão (situação que independe do operador), o operador teria que adotar uma massa teste tão leve que seja incapaz de perturbar sensivelmente o rotor em operação, ou uma massa de teste muito pesada que viesse a colocar o sistema mecânico em risco. Ou seja, situações que poderíamos considerar como exceções.

No entanto, se for necessário o terceiro giro com a massa de teste, o método proposto terá mais segurança e confiabilidade que o clássico, pois o software escolherá a melhor solução dentro da região que agrupa todas as possibilidades de solução caracterizada na Fig. 4.

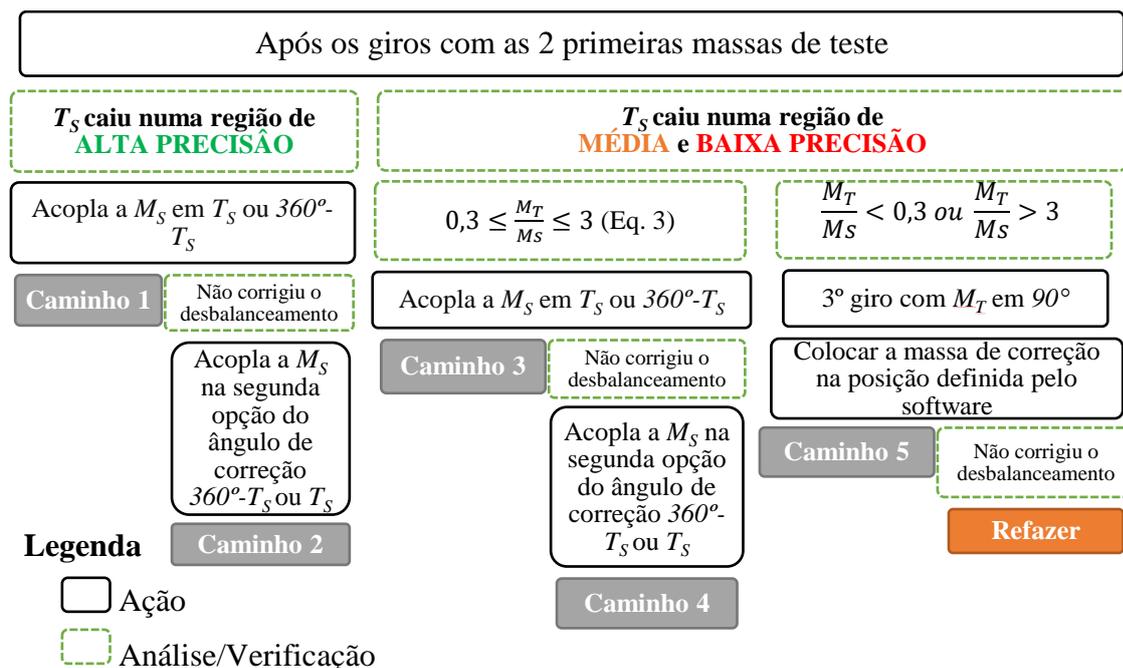


Figura 10. Fluxograma do *Four Run Method Accelerated*

## 7.2 Algoritmo de otimização para o *Four Run Method Accelerated*

O *Four Run Method Acelerated* utiliza um algoritmo de otimização para acelerar o método clássico. Para isso seguiu-se os passos previstos para construção de um problema de otimização (Pereira et al., 2012):

**Identificar as soluções viáveis.** O problema foi restringido ao garantir duas soluções possíveis após ao executar dois giros com massas de teste, ou seja, é sabido que o problema possui dois mínimos globais.

**Definir a situação inicial.** Os resultados apresentados Figuras 8, 9 e 10, foram obtidos partindo de uma situação inicial aleatória, onde as variáveis iniciais que caracterizam a situação inicial eram obtidas aleatoriamente numa função de densidade de probabilidade Gamma, garantindo que as variáveis que tiverem valores médios próximos a zero, nunca teriam valores negativos, como ocorreria se adotasse a função de densidade de probabilidade normal. As médias iniciais foram definidas sendo  $M_{S0}=M_T$ , pois a observação e conhecimento prático mostra que a massa de teste deve ter a mesma ordem de grandeza da massa de correção, assim esta é considerada uma boa tentativa inicial; e  $T_{S0}=0$ , que poderia ser qualquer outro ângulo, pois é impossível determinar a região com maior probabilidade de se encontrar o mínimo global.

**Efetuar uma perturbação possível.** A cada passo do processo iterativo é caracterizado por uma perturbação combinatória aleatória possível da situação anterior ( $i=m$ ) à situação corrente ( $i=n$ ). Esta perturbação combinada é resultado da soma de valores aleatórios com média em  $\Delta M$  e  $\Delta T$  respectivamente a  $M_{Sm}$  e  $T_{Sm}$ .

A perturbação aleatória  $\Delta T$  inicia com uma média de  $90^\circ$  e decresce discretamente. Após 500 passos a média atinge o valor mínimo de  $0,18^\circ$ , depois esta média permanece constante em  $0,18^\circ$  até atingir algum critério de parada. Os 500 primeiros passos são necessários para encontrar com segurança a região dos dois possíveis mínimos globais, enquanto os demais dedicam-se a encontrar o mínimo local ótimo na vizinha do mínimo global.

A perturbação  $\Delta M$  é igual à  $0,01M_T$ , pois observou-se que esta ordem de grandeza é capaz de produzir uma perturbação significativa na busca combinada para os mínimos globais e locais.

Principalmente pela escolha do posicionamento das 2 primeiras massas de teste, a  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , a massa estabiliza muito mais rápido que o ângulo de correção. Levando os esforços computacionais a se dedicarem mais na busca da posição de correção.

**Definir a função objetivo.** Neste caso a função objetivo calcula a distância  $D$  (Eq. 3) da razão entre desbalanceamentos medidos a cada giro com a massa de teste e o giro sem massa de teste para a mesma razão calculada com valores obtidos no passo corrente do processo de otimização e o medido com instrumentos. Se o valor para  $D_n < D_m$  o software armazena  $M_{Sn}$  e  $T_{Sn}$  e os utiliza como situação corrente para a tentativa. Se  $D_n > D_m$ , a tentativa é descartada, e volta adotar  $M_{Sm}$  e  $T_{Sm}$  como situação inicial para o próximo passo iterativo.

$$D = \left| \left| e^{iT_S} + \frac{M_T}{M_S} e^{iT_1} \right| - \left| \frac{A_1}{A_0} \right| \right| + \left| \left| e^{iT_S} + \frac{M_T}{M_S} e^{iT_2} \right| - \left| \frac{A_2}{A_0} \right| \right| + \left| \left| e^{iT_S} + \frac{M_T}{M_S} e^{iT_3} \right| - \left| \frac{A_3}{A_0} \right| \right| \quad (3)$$

Onde  $M_T$  é a massa de teste,  $T_1, T_2, T_3$  os ângulos de posicionamento das massas de testes,  $A_1, A_2, A_3$  e  $A_0$  as amplitudes de vibração medidas com a instrumentação,  $M_S$  e  $T_S$  é a massa e o ângulo de correção definidos a cada tentativa de encontrar a solução.

**Definir os critérios de parada.** O código trabalha com 2 possíveis condições de parada.

Foi definido o máximo de 10.000 passos iterativos, após isso os cálculos cessam mesmo se o resultado não atender a qualidade necessária, pois entende que o algoritmo entrou num loop infinito. Isto pode ocorrer caso os 500 primeiros passos não encontrem o mínimo global, e após isso procurem o mínimo local na vizinhança incorreta, tornando cada passo instável e possivelmente não irão evoluir para uma situação de otimização.

Nos casos simulados para este artigo, o segundo critério de parada é pela qualidade, e observa-se que o efeito medido ao acoplar uma massa de teste refere-se ao somatório vetorial entre a massa desbalanceada e a massa de teste, que podemos de chamar de massa relativa ( $M_R$ ). Adicionalmente, é possível efetuar o somatório vetorial entre a massa de teste e massa de correção  $M_S$  obtida no passo corrente, porém, se ao invés de utilizar a massa de correção situada em  $T_S$  e sim em  $T_S - 180^\circ$  simulamos o efeito da massa desbalanceada (Eq. 5), e podemos chamá-la de massa de verificação ( $M_V$ ). Ou seja, ambas representam o mesmo efeito, porém a primeira é obtida com a instrumentação e a segunda com os valores obtidos a cada passo do processo iterativo.

$$M_{R1} = \frac{A_1 \cdot k}{w^2 \cdot r}. \quad (4)$$

$$M_{V1} = \sqrt{M_T^2 + M_S^2 + 2 M_{T1} M_S \cos(|T_1 - (T_S - 180^\circ)|)}. \quad (5)$$

Sendo  $A_1$  a amplitude de vibração medida com a aplicação da massa de teste 1,  $k$  o coeficiente que relaciona a amplitude de vibração com a massa de desbalanceada,  $w$  a velocidade de rotação do rotor,  $r$  o raio de aplicação das massas de teste,  $M_T$  a massa de teste,  $T_1$  o ângulo de posicionamento da massa de teste 1,  $M_S$  massa e  $T_S$  o ângulo de correção encontrada como resultado no passo corrente.

Quanto mais próximo de 0 for a diferença  $|1 - M_{V1}/M_{R1}|$ , mais próximo da solução esperada estará a solução encontrada, e o algoritmo encerra quando *Cond* (Eq. 6) é inferior a 0,001.

$$Cond = \frac{|M_{V1}-M_{R1}|}{M_{R1}} + \frac{|M_{V2}-M_{R2}|}{M_{R2}} + \frac{|M_{V3}-M_{R3}|}{M_{R3}}. \quad (6)$$

Nos casos reais, poderá ser utilizada uma condição de parada a partir da função custo  $D$  (Eq. 3).

Apresenta-se a abaixo o algoritmo estocástico de otimização desenvolvido, representado em 3 partes (Fig. 11, 12 e 13):

```
%Garantindo entrada no comando while da função na Terceira Parte do algoritmo|
mteste1=100*mr1;
mteste2=100*mr2;
mteste3=100*mr3;
if mt3==0
    condini=(abs(mteste1-mr1)/mr1)+(abs(mteste2-mr2)/mr2);
else
    condini=(abs(mteste1-mr1)/mr1)+(abs(mteste2-mr2)/mr2)+(abs(mteste3-mr3)/mr3);
end

%Variáveis iniciais
mini=mt;      % amplitude da tentativa inicial
thetaini=0;   % ângulo da tentativa inicial

%Entrada na função estocástica com apenas 2 massas de teste
[mf,af]=estoc(mt1,mt2,mt3,theta1,theta2,theta3,mini,thetaini,condini,Vr1,Vr2,Vr3,Vrd,mr1,mr2,mr3);
```

Figura 11. Primeira parte do algoritmo de otimização do *Four Run Method Accelerated*

```

function[mf,af]=estoc(mt1,mt2,mt3,theta1,theta2,theta3,mini,thetaini,condini,Vr1,Vr2,Vr3,Vrd,mr1,mr2,mr3)
clear theta m Dist DmA DistA jj Dist cond j Dthetafin Dthetaini DthetaAv thetaE int

D=inline('abs(abs(exp(i*theta)+(m1/m)*exp(i*theta1)))-abs(Vr1/Vrd))+|
abs(abs(exp(i*theta)+(m2/m)*exp(i*theta2))-abs(Vr2/Vrd))+
abs(abs(exp(i*theta)+(m3/m)*exp(i*theta3))-abs(Vr3/Vrd))',
'm1','m2','m3','theta1','theta2','theta3','Vr1','Vr2','Vr3','Vrd','m','theta');

% _____ Incrementos dados a cada iteração
DmA=0.01*mt1;
Dthetaini=pi/2;
N=500;

% _____ Criando uma diminuição gradual na amplitude dtheta
Dthetafin=Dthetaini/N;
DthetaAv=linspace(Dthetaini,Dthetafin,N);

% _____ Armazenamento das condições iniciais
m(1)=mini;
theta(1)=thetaini;
cond(1)=condini;
Dist(1)=D(mt1,mt2,mt3,theta1,theta2,theta3,Vr1,Vr2,Vr3,Vrd,m(1),theta(1));

% _____ Variáveis iniciais antes do processo iterativo
mA=m(1);
thetaA=theta(1);
DistA=Dist(1);

% _____ Contadores
j=1;
jj=0;

```

Figura 12. Segunda parte do algoritmo de otimização do *Four Run Method Accelerated*

```

while cond(j)>1e-2
j=j+1;

if j>10000 %condição de parada senão alcançar a convergência
break
elseif j>N %trava Dtheta em 0,18º
DthetaAv(j)=DthetaAv(N);
DthetaA=DthetaAv(N);
elseif j<=N
DthetaA=DthetaAv(j);
end

m(j)=mA+DmA*randn; % adicionado incremento a última amplitude válida
theta(j)=thetaA+DthetaA*randn; % adicionado incremento a última amplitude válida
Dist(j)=D(mt1,mt2,mt3,theta1,theta2,theta3,Vr1,Vr2,Vr3,Vrd,m(j),theta(j));

if Dist(j)<DistA % se a nova distância for menor que a anterior, entra-se no processo de inclusão de novos valores no vetor válido
jj=jj+1; % número de distâncias encontradas que são menores que a anterior

mA=m(j); % a amplitude recebe o novo valor válido
mE(jj)=mA; % a amplitude válida compõe o vetor que contém a sequencia de resultados válidos para esta condicional
thetaA=theta(j); % o ângulo recebe o novo valor válido
thetaE(jj)=thetaA; % o ângulo válido compõe o vetor que contém a sequencia de resultados válidos para esta condicional

int=fix(thetaE(jj)/(2*pi));
thetaE(jj)=thetaE(jj)-int*2*pi;
if thetaE(jj)<0
thetaE(jj)=thetaE(jj)+2*pi; %garantindo que theta será um número positivo e estará entre 0º e 360º dentro do vetor
end
thetaA=thetaE(jj); %garantindo que theta válido será um número positivo e estará entre 0º e 360º

DistA=Dist(j); % a distância recebe o novo valor válido
DistE(jj)=DistA;% a distância válida compõe o vetor que contém a sequencia de resultados válidos para esta condicional
end

mteste1=sqrt(mt1^2+mA^2+2*mt1*mA*cos(thetaA-pi));
mteste2=sqrt(mt2^2+mA^2+2*mt2*mA*cos(abs(theta2-(thetaA-pi)))));
mteste3=sqrt(mt3^2+mA^2+2*mt3*mA*cos(abs(theta3-(thetaA-pi)))));

if mt3==0
cond(j)=(abs(mteste1-mr1)/mr1)+(abs(mteste2-mr2)/mr2);
else
cond(j)=(abs(mteste1-mr1)/mr1)+(abs(mteste2-mr2)/mr2)+(abs(mteste3-mr3)/mr3);
end
end

af=thetaA;
intf=fix(af/(2*pi));
af=180/pi*(af-intf*2*pi);
mf=mA;

end

```

Figura 13. Terceira parte do algoritmo de otimização do *Four Run Method Accelerated*

Nas Figuras 11, 12 e 13 identifica-se todas as características de um problema de otimização (Holtz, 2005), conforme Tópico 5:

**Variáveis de projeto.** É a massa de correção  $M_S$  e o ângulo de correção  $T_S$  que no algoritmo estão identificados por  $m_A$  e  $\theta_A$ , respectivamente.

**Restrições.** Está imposto uma restrição à  $M_S$  ao adotar variações médias  $\Delta M$  de  $0,01M_T$ , ou seja, partindo da ideia de que o valor é próximo ao da massa de teste. Enquanto a restrição de  $T_S$  evolui junto com o processo de otimização, partindo de variações médias  $\Delta T$  de  $90^\circ$ , sempre no sentido horário, decaindo linearmente até  $0,18^\circ$  após 500 passos, e após isso mantém-se constante em  $0,18^\circ$ , até que algum critério de parada seja atendido.

**Espaço de busca.** Para  $M_S$  considera-se a ordem de grandeza da massa de teste como sendo um espaço de busca, e para  $T_S$  o espaço de restringe-se entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , não possuindo valores negativos e nem mais que 1 volta.

**Função Objetivo.** É a função  $D$ , que está apresentada na Fig. 12.

**Ponto Ótimo.** Na figura 13 é o valor de  $af$  e  $mf$ , onde o algoritmo chega ao fim e define-se a situação ótima combinada entre a massa de correção e sua posição angular.

**Valor Ótimo.** Nos casos simulados para este artigo, ocorro quando  $Cond$  (Eq. 6) é inferior a  $0,001$ .

## 8 APLICAÇÃO DO FOUR RUN METHOD ACCELERATED

Para exemplificar o método, o mesmo foi aplicado aos casos 1, 6 e 7 modelado no Tópico 6.1. Para cada 1 dos 3 casos, foram feitos 4 ensaios, variando a posição angular da massa desbalanceada e a massa de teste aplicada, de tal forma que pudéssemos ter as quatro combinações possíveis entre baixa e alta precisão e confiabilidade.

**Tabela 3. Resultados da aplicação do Four Run Method Accelerated**

	Ensaio 1 Baixa precisão Alta confiabilidade	Ensaio 2 Baixa precisão Baixa confiabilidade	Ensaio 3 Alta precisão Alta confiabilidade	Ensaio 4 Alta precisão Baixa confiabilidade
CASO 1 Massas de teste aplicadas à 1 m 650 rpm Massa desbalanceada de 100 g	TD=10° MT=80 g Esperado: <b>TS=190° e MS=100 g</b> Encontrado com 2 massas de teste: <b>TS=197,67° ou 162,33° e MS=93,36 g</b>	TD= 355° MT=5 g Esperado: <b>TS=175° e MS=100 g</b> Encontrado com 3 massas de teste: <b>TS=174,77° e MS=98,00 g</b>	TD=110° MT=150 g Esperado: <b>TS=290° e MS=100 g</b> Encontrado com 2 massas de teste: <b>TS=71,69° ou 288,30° ou 162,33° e MS=101,29 g</b>	TD=285° MT=500 g Esperado: <b>TS=105° e MS=100 g</b> Encontrado com 2 massas de teste: <b>TS=108,13° ou 251,87° e MS=100,31 g</b>
CASO 6 Massas de teste aplicadas à 1 m 10.000 rpm Massa desbalanceada de 400 g	TD=25° MT=250 g Esperado: <b>TS=205° e MS=400 g</b> Encontrado com 2 massas de teste: <b>TS=152,86° ou 207,14° e MS=383,03 g</b>	TD= 345° MT=100 g Esperado: <b>TS=165° e MS=400 g</b> Encontrado com 3 massas de teste: <b>TS=161,96° e MS=395,57 g</b>	TD=95° MT=900 g Esperado: <b>TS=275° e MS=400 g</b> Encontrado com 2 massas de teste: <b>TS=273,42° ou 86,57° e MS=409,51 g</b>	TD=240° MT=2.000 g Esperado: <b>TS=60° e MS=400 g</b> Encontrado com 2 massas de teste: <b>TS=298,90° ou 61,10° e MS=398,28 g</b>
CASO 7 Massas de teste aplicadas	TD=15° MT=3 g	TD= 335° MT=10 g	TD=75° MT=1 g	TD=300° MT=0,1 g

à 0,5 m 100 rpm	Esperado: $TS=195^\circ$ e $MS=1,5$ g	Esperado: $TS=155^\circ$ e $MS=1,5$ g	Esperado: $TS=255^\circ$ e $MS=1,5$ g	Esperado: $TS=120^\circ$ e $MS=1,5$ g
Massa desbalanceada de 1,5 g	Encontrado com 2 massas de teste: $TS=161,42^\circ$ ou $198,58^\circ$ e $MS=1,5$ g	Encontrado com 3 massas de teste: $TS=151,77^\circ$ e $MS=1,53$ g	Encontrado com 2 massas de teste: $TS=99,55^\circ$ ou $260,45^\circ$ e $MS=1,40$ g	Encontrado com 2 massas de teste: $TS=114,33^\circ$ ou $245,67^\circ$ e $MS=1,26$ g

Os ângulos de correção corretos obtidos tiveram uma diferença máxima de  $7,67^\circ$  em relação ao esperado, o que na prática é aceitável. Diversos rotores já possuem posições específicas para acoplar as massas de teste e de correção, seja determinada pela posição das pás, ou mecanismos próprios já previsto no projeto do rotor para operações de balanceamento, e essas posições não costumam ter espaçamentos inferiores à  $5^\circ$ .

A localização necessária de acoplamento da massa pode não está disponível, pois o gerador possui locais específicos para fazer tal acoplamento. Assim a massa deve ser dividida em duas, e cada uma acoplada nas posições vizinhas anterior e posterior mais próximas, de modo a soma do efeito das duas resulte no efeito desejado (GÓZ et al, sem data).

A depender da aplicação desejada, os resultados podem se tornar mais precisos, apenas ajustando algumas parametrizações fixadas no algoritmo e aumentando a capacidade de processamento do computador a ser utilizado.

## 9 CONCLUSÃO

O método *4 Run Method Accelerated* é aplicável em situações práticas, ao utilizar um algoritmo de otimização, viabiliza a utilização do método gráfico, que possui menos penetração no mercado que o método vetorial com ângulo de fase.

Realizando adaptações no algoritmo para relacionar as variáveis específicas de um conjunto hidrogerador, pode-se aplicar o *4 Run Method Accelerated* no balanceamento do mesmo considerando:

***O conjunto hidrogerador como um rotor rígido.*** Em velocidade menor que 5.000 rpm os rotores podem ser considerados como rígidos (Zhou et al, 2001).

***O plano de análise e de correção estando na mesma posição no gerador.*** O gerador é o elemento de maior inércia e responsável pelos desbalanceamentos que podem ser corrigidos em campo, obviamente depois de corrigidos todos eventuais problemas que possam existir no conjunto como um todo (desalinhamento, folgas, ovalização, desgastes, cavitação, etc.).

Existem métodos de transposição de plano na literatura, quando o plano de correção não coincidir com o de aplicação das massas de teste.

Os casos modelados no Tópico 6 validam o método, que apresentou estabilidade necessárias para os casos simulados, além de flexibilidade e trivialidade na alteração das restrições, variáveis e condições de parada.

Para as alterações a serem feitas no código deve-se ter conhecimento a capacidade de processamento do computador que está sendo utilizado. A depender da aplicação desejada, os resultados podem se tornar mais precisos, apenas ajustando algumas parametrizações fixadas no algoritmo e aumentando a capacidade de processamento do computador a ser utilizado.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, à minha esposa Talita Chimeli, aos colegas Neusa Lobato e Carmo Gonçalves representando a Eletronorte, ao amigo Ricardo Andrade representando a CooperRubi e aos professores Mário Olavo, Marcus Girão e Antônio Brasil Jr. Representando a Universidade de Brasília.

## **REFERÊNCIAS**

- Cordenonsi, A.Z., 2008. Ambientes, Objetos e Dialogicidade: Uma Estratégia de Ensino Superior em Heurísticas e Metaheurísticas. Tese de Doutorado: Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação – UFRGS. Porto Alegre-RS.
- FEESE, P. E. T. D., & Phillip E., G. (2004). Balance This! CAse histories from difficult balance jobs. 33rd Turbomachinery Symposium. San Antonio, Texas.
- Foiles, W.C., Allaire, P.E., Gunter E.J., 1998. Review: Rotor balancing. Department of Mechanical, Aerospace & Nuclear Engineering, University of Virginia. Virginia – USA (<http://downloads.hindawi.com/journals/sv/1998/648518.pdf>).
- Góz, R.D., Silva, T.C., SEM DATA. Apostila do Curso de Balancamento de Rotores. R&T Análise de Vibrações e Balancamento. Brasil.
- Grim, G. K., Haidler, J. W., & Mitchell Jr., B. J. (s.d.), 1994. The Basics of Balancing 101. Whitmore Lake: BTI - Balance Technology Inc.
- Hammes Jr., V. S., 2001. Balancamento sem Ângulo de Fase em Máquina com Apoios Rígidos e Flexíveis. Curitiba - PR: Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- Holtz, G. C. C., 2005. Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando algoritmo evolucionário. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.
- Lyons, J., 1998. Primer on Dynamic Balancing “Causes, Corrections and Consequences”. Maintech South ‘98 Conference and Exhibition. Houston – USA.
- Nasser, R.B. 2012. McCloud Service Framework, Arcabouço para Desenvolvimento de Serviços Baseados na Simulação de Monte Carlo na Cloud. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática PUC-Rio. Orientadora: BREITMAN, K.K. Rio de Janeiro-RJ.
- Pereira, M.A., Vasconcelos, J.A. 2012. Recozimento Simulado. Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística – Capítulo 8. Livro Coordenado por Gaspar-Cunha, A., Takahashi, R. e Antunes, A.H. Universidade de Coimbra. Coimbra-Portugal.
- PRÜFTECHNIK LTD, 2002. An Engineers Guide - Make Maintenance Matter – Optimising plant availability using laser shaft alignment, vibration analysis and dynamic balancing techniques. Burntwood Staffordshire – UK.
- Sucupira, I.R. 2004. Métodos Heurísticos Genéricos: Metaheurísticas e Hiper-Heurísticas. Orientador: Silva, F.S.C.. Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Matemática e Estatística, USP. São Paulo-SP.
- Rangel Jr., J. d., 2008. Análise Rotodinâmica de Equipamentos Sujeitos a Desbalanceamento Estático, Dinâmico e Modal. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, RJ: UFRJ.
- Velho, H.F.C, sem data. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. Disponível em <http://www.lac.inpe.br/~haroldo/CursoPI/CursoPI.pdf> e na página

<http://www.lac.inpe.br/~haroldo/scip.html>, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José do Campos Campo-SP.

Woodbury, K. A., 1995. What are Inverse Problems? Acesso em 25 de Novembro de 2012, disponível em The University of Alabama - Inverse Problems:  
<http://www.me.ua.edu/inverse/whatis.html>

Wowk, V. P., 2009. Expert Witness Report. New Mexico: Machine Dynamics, Inc.

Yoriyaz, H. 2009. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. Revista Brasileira de Física Médica. São Paulo-SP.

Zhou, S., & Shi, J., 2001. Active Balancing and Vibration Control of Rotation Machinery: A survey. The Shock and Vibration Digest, Vol 33, No 4.