

5 Conclusões

Foi detalhada a proposta de um esquema de controle para processos com múltiplos canais e duas fontes de variação, uma comum a todos os canais (variação do *nível-base*) e outra, correspondendo a variações individuais de cada canal em relação ao nível-base. O esquema consiste em um gráfico de controle para o nível-base e uma *group chart* para as diferenças dos canais em relação ao nível base. Embora tal esquema já tenha sido sugerido por Mortell e Runger (1995) e um esquema parecido tenha sido empregado por Passos (2005), o modelo formal do esquema, aqui detalhado, as expressões para cálculo de seus limites de controle, e a análise de seu desempenho são contribuições originais deste trabalho.

O esquema teve seu desempenho analisado por medidas de sensibilidade (probabilidades de sinalizar) e de rapidez de detecção (número médio de amostras até o sinal) de alterações na média da parcela individual de um dos canais. Tais medidas foram obtidas analiticamente e/ou por simulação computacional, e também foram utilizadas para comparação de desempenho com o esquema proposto por Mortell e Runger (*op. cit.*; daqui em diante abreviado por M&R) nas mesmas condições.

A análise contemplou processos com diferentes números de canais, diferentes tamanhos de subgrupos, diferentes probabilidades de alarme falso especificadas e diferentes magnitudes de alteração na média da parcela individual de **um** dos canais.

Os resultados obtidos demonstraram a superioridade do esquema proposto na detecção de variações superiores a um desvio-padrão na média da parcela individual de um canal do processo. Para variações menores, os esquemas foram equivalentes em muitos casos, e na maioria dos demais, o esquema de M&R foi ligeiramente superior; de qualquer forma, nenhum dos dois esquemas é eficiente para estas alterações de pequena magnitude.

A análise limitou-se à situação “alteração apenas na média da parcela individual de um dos canais”, pelas razões seguintes: se tais parcelas forem

independentes (por hipótese, a parte comum é o nível-base) e a ocorrência de causas especiais for esporádica, como deve-se esperar, então alterações nas parcelas individuais de mais de um canal simultaneamente devem ser muito raras. Alterações comuns aparecerão no nível-base. (A rigor, não é impossível imaginar causas que comecem a afetar um canal e depois outro, e vão atingindo diversos canais sucessivamente — por exemplo, impurezas que provoquem entupimentos; mas isso deve começar primeiro por *um* canal, e acaba afetando o nível-base. Esta situação não está no escopo do presente trabalho, e o desempenho do esquema para tais casos ainda está em aberto para análise). Quanto a não se ter analisado o desempenho do gráfico para o nível base, a razão é (além das limitações de tempo) que o gráfico do nível-base é idêntico (em definição e utilização) em ambos os esquemas, de modo que neste aspecto o desempenho de ambos os esquemas é o mesmo; ou melhor, neste aspecto, não há dois esquemas de controle distintos, apenas um. Além disso, trata-se de um gráfico convencional de \bar{X} , cujo desempenho já foi fartamente analisado na literatura. A possibilidade de sinalização pelo gráfico do nível-base, considerada neste trabalho, é quanto a causas especiais afetando a parcela individual de um dos canais, a que ele também é sensível, embora não tenha sido concebido com este propósito (da mesma forma que um gráfico de \bar{X} também é sensível a aumentos na dispersão do processo). A probabilidade de sinal pelo gráfico do nível-base, neste caso, depende da razão entre as variâncias do nível-base e da parcela individual de cada canal; os valores aqui calculados foram para o caso de nível-base estático (sem variação), situação atípica. O propósito foi fornecer um sentimento desse efeito das alterações em um canal sobre o gráfico, e os valores obtidos para este caso são portanto limitantes superiores para as probabilidades de sinal. Quanto ao desempenho do gráfico do nível-base na detecção de alterações no nível-base, esta é uma questão para pesquisa futura. Como dito, trata-se de um caso de gráfico de \bar{X} , mas há uma peculiaridade, que é o fato de haver duas componentes de variação no processo.

Nenhum dos dois esquemas mostrou-se muito eficiente para detecção de alterações menores de três desvios-padrão, mas valem algumas ressalvas: com o aumento do tamanho de amostra, o desempenho melhora (ainda que, com grande número de canais, possa não ser praticável trabalhar com mais que observações individuais); outra opção é adotar (se for viável) intervalos de tempo entre

amostras suficientemente curtos para garantir que, mesmo com NMA's não muito reduzidos, o *tempo* esperado até o sinal não seja demasiadamente longo; e, o que é mais importante, talvez: dado que a variabilidade total do processo compõe-se de duas parcelas, a variabilidade do nível-base e a variabilidade individual dos canais, uma alteração, na média da parcela de um canal, da ordem de três desvios-padrão (desta parcela) corresponde a uma alteração bem menor em desvios-padrão do processo. Em conseqüência, é provável que na maioria das situações reais, as alterações que sejam relevantes detectar na parcela de um canal sejam “grandes”, da magnitude de três ou mais desvios-padrão. A magnitude relevante em cada caso dependerá, evidentemente, da capacidade do processo, mas será tão maior quanto maior for a razão entre o desvio-padrão do nível-base e o desvio-padrão das parcelas individuais dos canais.

Finalmente, os esquemas foram comparados usando gráficos “de Shewhart”, i.e., usando diretamente as estatísticas amostrais obtidas (o R_i do esquema de M&R e as diferenças em relação ao nível-base do esquema proposto). M&R já haviam concluído pela superioridade do uso de sua estatística em esquemas CUSUM e EWMA (em relação a usá-la em um gráfico de Shewhart); pode-se também empregar CUSUM ou EWMA no esquema proposto. Como este é um primeiro trabalho analisando tal esquema, o uso de gráficos de Shewhart permite comparar o desempenho das duas estatísticas, e visualizar os efeitos de vieses e de correlações entre as diferentes estatísticas, em cada esquema. É razoável esperar que a estatística mais eficiente em um gráfico de Shewhart seja também a mais eficiente em um esquema CUSUM ou EWMA. A proposta e análise da incorporação de esquemas CUSUM ou EWMA ao esquema proposto é uma extensão que merece ser investigada.

O esquema proposto não foi comparado com o esquema de Runger *et al.* (1996), que juntamente com o esquema de M&R, constituem praticamente os dois únicos esquemas na literatura de controle de processos multicanal que levam em conta a existência de duas fontes de variação (comum aos canais e individual), porque tal esquema tem, para o caso de alteração em um canal apenas, desempenho no máximo idêntico, e muitas vezes inferior, ao esquema de M&R. Assim, o esquema aqui proposto, ao mostrar-se mais eficiente que o mais eficiente da literatura precedente, revela-se o mais eficiente de todos.

Além dessa maior eficiência na detecção de variações na média da parcela individual de um dos canais do processo, o esquema proposto, por trabalhar com as diferenças em relação ao nível-base, ainda apresenta uma vantagem adicional em relação ao esquema de M&R, que será detalhada a seguir.

Para controle da dispersão das parcelas individuais dos canais, pode-se usar uma *group chart* de S (ou de R) dos valores individuais de cada canal; tal *group chart* poderia ser usada juntamente com a *group chart* das diferenças médias, mas também poderia ser usada em conjunto com o esquema de M&R, no caso de amostras com $n > 1$. Porém, no caso de $n = 1$ (muito freqüente, senão o caso mais freqüente em se tratando de PMC, em que o número de canais pode tornar proibitiva a retirada de mais de uma medida por canal em cada amostra) tal *group chart* de S ou R precisaria ser substituída por uma *group chart* de MR (amplitude móvel) das diferenças. Não seria possível trabalhar com uma *group chart* de MR das observações individuais de cada canal diretamente, pois uma parcela de variação das observações de cada canal é devida à variação do nível-base, o que reduziria a sensibilidade da *group chart* a aumentos na dispersão da parcela individual em cada canal. Neste caso, só trabalhando com as diferenças é que se poderia construir uma *group chart* de MR mais eficiente. Esta é mais uma vantagem de trabalhar com as diferenças em relação ao nível-base.

A análise formal do desempenho de tal esquema fica como indicação para pesquisa futura.

Outras questões em aberto, além das várias já mencionadas, são: como o esquema proposto se aplicaria ao caso de canais com médias (e possivelmente desvios-padrão) diferentes; qual o tamanho de amostra e intervalo entre amostras ideais (projeto do esquema); e esquemas alternativos para os casos particulares de processos com dois ou três canais; principalmente no caso de dois canais, em que as estatísticas são totalmente correlacionadas.

Tal lista não esgota o número de questões abertas, que é muito grande. Este trabalho apenas iniciou a investigação e expôs algumas dessas questões, que podem dar origem a uma longa e desafiadora linha de pesquisa. Um dos maiores pesquisadores atuais em CEP disse “*generalization of the multiple-stream methods is needed*” (W. Woodall, comunicação pessoal, 2007).