

Estudo da correlação cruzada e da correlação múltipla dos sinais de ruído binário generalizado

José A. Medel*; Fidel E. Díaz**; Claudio Garcia***

* *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*
(e-mail: joseangel93@usp.br).

** *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*
(e-mail: fediaza@usp.br).

*** *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil*
(e-mail: clgarcia@lac.usp.br).

Abstract: The correlation between excitation signals in multivariable systems affects the obtention of significant data in the system identification experiments. In this work, a study is made of the cross correlation and the multiple correlation between generalized binary noise signals, generated from two industrial benchmarks, a heavy oil fractionator and a fluid catalytic cracker. The probability of non-switching, as well as the minimum switching time are the modified parameters, allowing to obtain a relationship between them and the cross-correlation of the projected signals.

Resumo: A correlação entre sinais de excitação em sistemas multivariáveis afeta a obtenção de dados significativos nos experimentos de identificação de sistemas. Neste trabalho é feito um estudo da correlação cruzada e da correlação múltipla entre sinais de ruído binário generalizado, gerados a partir de dois benchmarks industriais, um fracionador de óleo pesado e um craqueador catalítico de fluido. A probabilidade de não chaveamento, bem como o tempo mínimo de chaveamento são os parâmetros modificados, permitindo obter uma relação entre eles e a correlação cruzada dos sinais projetados.

Keywords: GBN, cross-correlation, system identification, excitation signals, probability of non-switching.

Palavras-chaves: GBN, correlação cruzada, identificação de sistemas, sinais de excitação, probabilidade de não chaveamento.

I. INTRODUÇÃO

Na engenharia, as relações físicas que governam a dinâmica dos sistemas são geralmente desconhecidas, portanto, encontrar um modelo que descreva essas relações com mais precisão sempre foi um desafio. Na maioria desses sistemas só é possível conhecer suas entradas e saídas por meio de experimentos e coleta de dados. A obtenção de modelos de sistemas desconhecidos, capazes de simular seu comportamento real, é um dos principais objetivos da Engenharia de Controle. São inúmeros os estudos que reúnem a teoria sobre Identificação de Sistemas, com destaque para os livros (Söderström & Stoica, 1989) e (Ljung, 1999). Atualmente, esta técnica está sendo usada principalmente para fins de supervisão, diagnóstico, prevenção, detecção de falhas e controle. Em geral, o processo de identificação consiste em quatro etapas: projeto e realização dos experimentos, determinação da estrutura do modelo, estimativa do modelo e validação. O projeto do experimento permite tomar decisões como: quais sinais medir, quando os medir e projetar os sinais de excitação; com o objetivo de que os dados coletados sejam o mais informativos possível (Ljung, 1999). A maioria dos processos industriais são de natureza multivariável, portanto, o modelo dinâmico desses sistemas é fundamental para o projeto de sistemas de

controle automático baseados em modelos, tais como controle preditivo (MPC) e controle por modelo interno (IMC).

Nos experimentos, os sinais de excitação são recomendados para aplicações em malha aberta ou malha fechada, visando causar variações nas saídas do processo que permitam obter modelos de processos dinâmicos. Portanto, a qualidade dos sinais de excitação tem grande relevância na obtenção de bons modelos, sendo que o tipo de sinal e a duração do experimento influenciam nos resultados da identificação; o sinal deve ser persistentemente excitante (Ljung, 2012). Há muitas publicações que consideram o projeto de sinais de identificação, bem como comparações entre os diferentes métodos. Entre os principais grupos de métodos de projeto de sinais de excitação em identificação de sistemas, podemos citar: sinais aleatórios (Tulleken, 1990), sinais de espectro fixo (Tan & Godfrey, 2002), sinais otimizados por computador (Tan et al., 2005), sinais de pulso (de la Barra et al., 2008) e sinais híbridos (Kuramoto, 2012).

Em teoria, os sinais de excitação devem ter características de ruído branco, para que as entradas sejam completamente descorrelacionadas. Em sistemas multivariáveis, onde as entradas são excitadas simultaneamente, sinais de excitação não correlacionados são usados, para que seja atribuído a uma

entrada o efeito observado em alguma saída pelo método de identificação usado (Ljung, 2012). A baixa complexidade de geração das funções de autocorrelação e correlação cruzada, além da capacidade de ajustar seu espectro e amplitude de potência (dependendo dos critérios de projeto desejados), justificam o uso dos sinais binários na identificação de sistemas multivariáveis. O sinal binário pseudoaleatório (*Pseudo Random Binary Sequence, PRBS*) é um dos sinais de excitação para identificação de sistemas mais conhecidos. Por outro lado, o conceito de projeto do sinal GBN proposto em (Tulleken, 1990) destaca que o GBN é um sinal de entrada de excitação mais atraente em comparação com o PRBS (Hung et al., 2015).

A proposta deste trabalho é estudar a correlação cruzada e a correlação múltipla entre sinais de excitação do tipo ruído binário generalizado (*Generalized Binary Noise, GBN*), usados na identificação de sistemas com múltiplas entradas. São utilizados como casos de estudo dois *benchmarks* industriais, um fracionador de óleo pesado 3x7 (*HOF*), aqui intitulado *benchmark Shell* e um craqueador catalítico de fluido 6x7 (*FCC*), aqui denominado *FCC benchmark*.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta a formulação do problema. A Seção III descreve os benchmarks utilizados no estudo, bem como a geração dos conjuntos dos sinais *GBN* para cada um deles. A Seção IV apresenta os conceitos da correlação cruzada e da correlação múltipla. A Seção V apresenta os resultados obtidos para cada sistema estudado. Finalmente, na Seção VI, são apresentadas as conclusões.

II FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Ao identificar sistemas multivariáveis, busca-se usar sinais com uma baixa correlação, assim a baixa complexidade de geração das funções de autocorrelação e correlação cruzada dos sinais binários justificam seu uso. Entre os sinais binários mais comumente usados estão o *PRBS* e o *GBN*, sendo o último o mais vantajoso. A principal vantagem é que o espectro de potência do sinal *GBN* não tem quedas em altas frequências, que possam ser afetadas por ruído (Darby & Nikolaou, 2014). Dois parâmetros fundamentais para o projeto de sinais *GBN* são o tempo mínimo de comutação e a probabilidade de não comutação, onde o conteúdo de frequência do sinal é aguçado pelo ajuste da probabilidade de não comutação em cada ponto de amostragem (Hung et al., 2015).

Partindo desses dois parâmetros, surge a seguinte dúvida: sua variação afetará a correlação cruzada e a correlação múltipla entre os sinais de excitação para sistemas multivariáveis? Visando responder a esta questão, neste trabalho é feita uma análise da correlação cruzada e da correlação múltipla deste tipo de sinal binário ao variar estes parâmetros. Como resultado desta análise, espera-se achar um conjunto de sinais de baixa correlação para identificar os dois sistemas em estudo.

II.1 Metodologia

Partindo do conhecimento das principais características de dois benchmarks industriais, são projetados diferentes conjuntos de sinais de excitação. Para cada caso de estudo são gerados dois conjuntos de sinais *GBN*, com diferentes tempos mínimos de chaveamento. Os tempos mínimos utilizados são:

o maior tempo de acomodação (T_{max}) entre as saídas dos sistemas estudados, ao serem excitados por um sinal do tipo degrau em malha aberta e a sua metade ($T_{max}/2$). Sabendo que as plantas industriais normalmente operam em faixas de baixa frequência e que ao aumentar p (probabilidade de não chaveamento) são gerados sinais de baixa frequência, foi escolhido um intervalo de $p=0,5$ até $p=0,998$. Cada conjunto se caracteriza por ter 51 grupos de sinais distintos, obtidos ao variar a probabilidade de não chaveamento em 0,0098, desde $p=0,5$ até $p=0,998$. Visando analisar o efeito do aumento da probabilidade de não chaveamento, se utilizaram as mesmas sementes para obter cada um dos 51 grupos. Ver Figura 1.

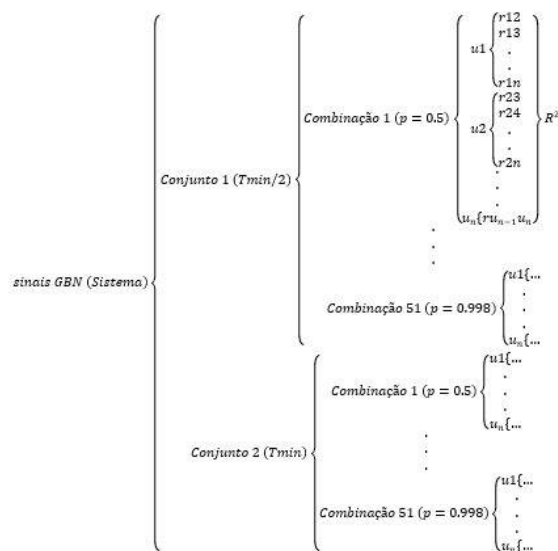


Figura 1: Diagrama geral dos conjuntos de sinais para um sistema.

Para analisar o fator de correlação múltipla, é preciso conhecer os valores das diferentes correlações intermediárias (simples) e as dos resíduos. Em um sistema de três sinais, a correlação parcial entre dois sinais $r_{12.3}$ é a correlação linear entre as variáveis 1 e 2, mantendo-se constante a variável 3. Porém, uma estimativa $r_{12.3}$ pode ser obtida mediante o desvio ou resíduo e_{13} e o desvio e_{23} . Neste trabalho, primeiro são encontradas as correlações intermediárias das combinações dos sinais para cada sistema, sendo 3 do *Shell HOF* e 15 do *FCC*. O comando *crosscorr(x,y,Lags)* do MATLAB® permite calcular os valores de correlação cruzada para dois conjuntos de dados (dependendo da quantidade de atrasos especificados, neste trabalho utilizaram-se 120, garantindo um tempo maior que os tempos mortos das dinâmicas dos sistemas).

III. GERAÇÃO DE SINAIS DE EXCITAÇÃO

III.1 Sinal de ruído binário generalizado GBN

O ruído binário (*binary noise, BN*) ou sequência binária aleatória é um sinal que varia entre dois níveis fixos, baixo (L) e alto (H), e onde o tempo decorrido (T_{sw}) entre duas comutações consecutivas é uma variável estocástica. Os *BN* mais utilizados são aqueles onde T_{sw} só pode ser realizado em um espaço de tempo discreto (1):

$$N * T := (t = kT \mid T \in R^+; k = 1,2,3...) \quad (1)$$

onde T é o tempo de comutação básico (mais rápido), capaz de gerar sinais de tempo contínuo e de tempo discreto (Tulleken, 1990). Ao usar distribuições geométricas gerais para T_{sw} , é possível obter um novo tipo de sinal altamente vantajoso em identificação de sistemas e que melhora o controle da resposta em frequência do sinal de ruído binário generalizado *GBN* (Tulleken, 1990). No sinal *GBN*, T_{sw} segue uma distribuição geométrica específica com o parâmetro p , tal que:

$$P(S_k = S_{(k-1)}) = p \quad (2)$$

$$P(S_k \neq S_{(k-1)}) = 1 - p \quad (3)$$

onde p é a probabilidade de não chaveamento (2), $(1-p)$ de chaveamento (3) e S é um sinal real. A Figura 2 exibe o exemplo de um sinal *GBN*.

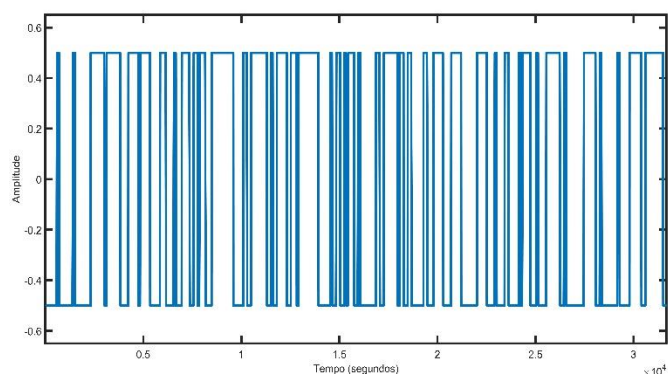


Figura 2: Exemplo de sinal *GBN*.

III.II Geração de sinais de excitação para o benchmark Shell

A Figura 3 mostra um fracionador composto por três circuitos laterais de circulação (encarregados de remover o calor para obter a separação desejada do produto) e três extrações de produto. Os dois circuitos superiores (*upper reflux e intermediate reflux*) agem como perturbações (d_1, d_2) para a coluna; enquanto o circuito inferior (*bottoms reflux*) pode ser considerado como uma variável manipulada (u_3), pois tem um controlador de entalpia que regula a remoção de calor (Prett & Morari, 1987). O objetivo principal do controle é manter as composições de extração superior e lateral (y_1 e y_2 , variáveis controladas) em seus pontos de ajuste, compensando as perturbações não medidas no refluxo superior e intermediário (d_1, d_2) (Yu et al., 1994). As especificações dos produtos para a extração superior e lateral são determinadas pelos requisitos econômicos e operacionais; não sendo assim para a extração inferior, pois não há especificação do produto, só uma restrição operacional na temperatura nesta parte da coluna (Prett and Morari, 1987). As variáveis de saída: temperaturas de refluxo superior (y_3 e y_4), temperatura de extração lateral (y_5) e temperatura de refluxo intermediária (y_6) são medições de temperatura secundárias, que podem ser usadas para controle inferencial. A temperatura de extração de refluxo inferior (y_7) deve ser mantida no seu ponto de ajuste. A extração superior de produto (u_1) e a extração lateral de produto (u_2) são consideradas variáveis manipuladas.

Para o projeto dos sinais foi implementada uma função que gera conjuntos de sinais *GBN*, permitindo configurar os

seguintes parâmetros: tempo mínimo de não chaveamento, probabilidade de não chaveamento, número de entradas (com seus valores de amplitude), assim como o valor da semente para gerar as seqüências aleatórias. Analisando a Tabela 1, se percebe que os três sinais de entrada do sistema têm a mesma amplitude. Ao excitar este sistema em malha aberta com um sinal degrau, foram obtidos diferentes valores de tempo de acomodação nas saídas, obtendo-se um valor máximo $T_{max}=200$ min. Este parâmetro e sua metade foram usados como critérios de projeto para dois grupos de sinais gerados (adotando-os como tempo mínimo de não chaveamento). Na Tabela 1 são apresentados os valores de ponto de ajuste e restrição. Os sinais têm um comprimento $N=51150$, valor bem superior que a maior constante de tempo do sistema. De modo geral, foram obtidos dois conjuntos de sinais (um para cada valor de tempo escolhido $T_{min}=100$ min, $T_{min}=200$ min).

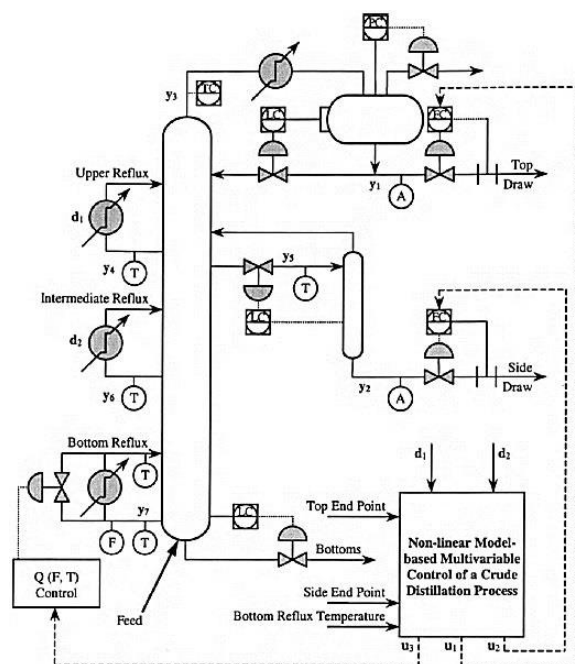


Figura 3: Shell HOF e problema de controle (Wahyudi et al., 2018).

Tabela 1. Restrições de variáveis no HOF (Yu et al., 1994)

Variável	Nominal	Mínimo	Máximo
y_1, d_1, d_2	0	-0.5	0.5
y_2	0	-	-
y_3, y_4, y_5, y_6	-	-1	1
y_7	0.5	-0.5	-
u_1, u_2, u_3	-	-0.5	0.5

Cada conjunto é formado por 51 combinações de três sinais, obtidas pela variação da probabilidade de não chaveamento em 0,0098, desde $p=0,5$ até $p=0,998$.

III.III Geração de sinais de excitação para o FCC benchmark

Outro benchmark bem conhecido é uma unidade de craqueamento catalítico de fluido (*FCC, fluid catalytic cracking*) proposto em (Grosdidier et al., 1993). Em sua configuração geral, a unidade exibida na Figura 4 é típica de muitas unidades *FCC* em operação, portanto oferece uma boa oportunidade para um estudo de caso. O modelo de estudo tem um total de

13 variáveis, sendo 6 de entrada e 7 de saída (ver Tabela 2). As variáveis de entrada (manipuladas) são: fluxo de ar de combustão (u_1), fluxo de gásóleo quente (u_2), gás frio combinado e óleos recicláveis (u_3), temperatura de pré-aquecimento de alimentação (u_4), temperatura de saída do riser (u_5) e fluxo de óleo reciclado da saída do controlador (u_6). As variáveis de saída (medidas) são: concentração de gás combustível (y_1), temperatura do leito do regenerador (y_2), fluxo de gás combustível (y_3), saída do controlador de pressão de sucção do compressor de gás úmido (y_4), temperatura de saída do riser (y_5), catalisador regenerador diferencial de pressão da válvula deslizante (y_6) e o diferencial de pressão da válvula deslizante do catalisador gasto (y_7).

Ao excitar este sistema em malha aberta com um sinal de-grau, foram obtidos diferentes valores de tempos de acomodação nas saídas, sendo 80 minutos o maior valor. Analogamente ao projeto dos sinais para o sistema Shell HOF, foram gerados dois conjuntos de sinais (um para cada valor de $T_{min}=40$ min e $T_{min}=80$ min). Cada conjunto é formado por 51 combinações dos seis sinais, obtidas pela variação da probabilidade de não chaveamento em 0,0098, desde $p=0,5$ até $p=0,998$. Assim como para o sistema Shell HOF, os sinais têm um comprimento $N=51150$.

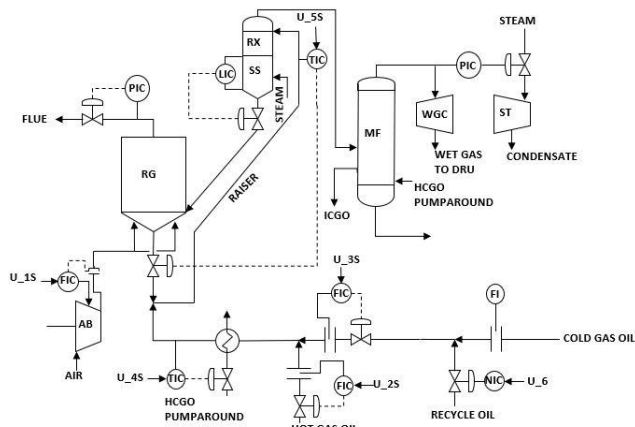


Figura 4: FCC Benchmark (Grosdidier et al., 1993).

Tabela 2. Restrições de variáveis no FCC (Grosdidier et al., 1993)

Variável	Nominal	Mínimo	Máximo
y1 (%)	1	-	-
y2 (°C)	711	70.5	735
y3 (T/s)	0.0043	0	0.5
y4 (%)	60	0	70
y5 (%)	70	0	80
y6 (kPa)	32	22	-
y7 (kPa)	020	0	24
u1 (T/h)	154.3	140	155
u2, u3 (m ³ /h)	100	90	110
u4 (°C)	240	230	250
u5 (°C)	520	515	535
u6 (%)	50	20	80

IV. ESTUDO DA CORRELAÇÃO

IV.I Correção Cruzada

O coeficiente de correlação de Pearson (Pearson, 1999), também conhecido como coeficiente de correlação, é a medida mais usada para analisar a dependência entre dois conjuntos de dados, gerando valores absolutos entre 0 e 1. No domínio do tempo para dois sinais (X, Y), o coeficiente r_{xy} é calculado em diferentes pontos de deslocamento, obtendo-se uma função de correlação cruzada (FCC). O valor obtido indica quão forte é a correlação entre os sinais, mas é preciso conhecer se os sinais estão realmente relacionados ou apenas se eles têm essa relação como consequência do acaso, porém sua validade depende da probabilidade de afirmar que seu valor é diferente de zero. Do ponto de vista estatístico, um coeficiente de correlação cruzada é significativo (sinais descorrelacionados) a 95% de confiança se os limites da FCC obedecem à seguinte condição (4) (Brockwell & Davis, 1991):

$$r_{lim} = \pm 1.96 / \sqrt{2 + N} \approx 2 / \sqrt{N} \quad (4)$$

IV.II Correção Múltipla

O coeficiente de correlação múltipla R (geralmente, o que é informado e interpretado é R^2) é um parâmetro cujo valor absoluto varia entre 0 e 1. Quanto mais próximo da unidade, maior o grau de associatividade entre as variáveis e, à medida que se aproxima de zero, a relação tende a desaparecer (Morales Vallejo, 2011). Se houver três variáveis, haverá três correlações simples (r_{zx}, r_{zy}, r_{xy}) entre elas, que representam a relação linear que há entre essas variáveis, duas a duas, sem considerar a possível influência da terceira. Neste caso, é possível saber o valor de correlação múltipla pela Expressão (5):

$$R = \sqrt{\frac{r_{zx}^2 + r_{zy}^2 - 2r_{zx}r_{zy}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2}} \quad (5)$$

Para facilitar seu cálculo, há outra relação (6), em função de $r_{12}r_{23}r_{31}$:

$$1 - R^2_{1,2,3} = (1 - r^2_{12})(1 - r^2_{13,2}) \quad (6)$$

onde (7):

$$r_{13,2} = \frac{r_{13} - r_{12}r_{23}}{\sqrt{(1 - r^2_{12})(1 - r^2_{23})}} \quad (7)$$

De forma geral (8):

$$1 - R^2_{1,2,3...k} = (1 - r^2_{12})(1 - r^2_{13,2})(1 - r^2_{1k,23...(k-1)}) \quad (8)$$

Analogamente (9):

$$r_{12,34...k} = \frac{r_{12,34...(k-1)} - r_{1k,34...(k-1)}r_{2k,34...(k-1)}}{\sqrt{(1 - r^2_{1k,34...(k-1)})(1 - r^2_{2k,34...(k-1)})}} \quad (9)$$

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao estudar o sistema *Shell HOF*, para cada um dos 51 conjuntos de sinais gerados (Seção III.II) foram obtidas 3 combinações (sinal1-sinal2, sinal2-sinal3, sinal3-sinal1). A correlação cruzada de cada combinação teve como resultado um vetor de 241 valores entre -1 e 1, com os valores absolutos entre 0 e 1. De cada vetor foram escolhidos o maior e o menor valor para todos os conjuntos de sinais, possibilitando criar a Figura 5. Na Figura 5(a) se observa como os valores mínimos

da correlação cruzada entre as diferentes combinações dos sinais de entrada se encontram relativamente dentro do limite (r_{lim}) conforme aumenta p , até $p=0,7$ aproximadamente.

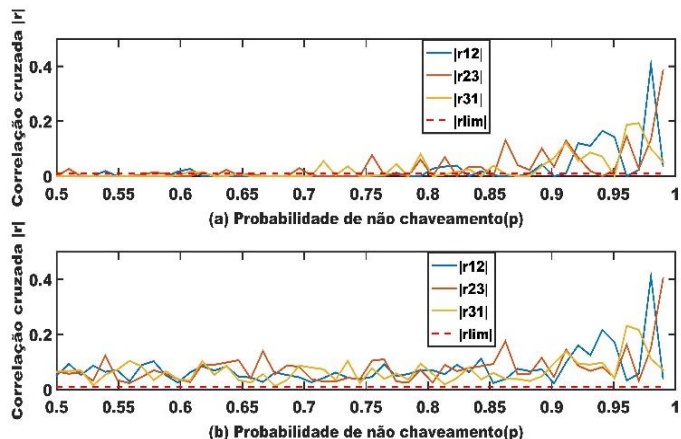


Figura 5: Valores absolutos da correlação cruzada para as 3 combinações de sinais para a *Shell HOF* quando T_{min} vale 100 min, (a) mínimos (b) máximos.

Para $p > 0,7$ a correlação cruzada entre os sinais ultrapassa o valor limite, sendo $p > 0,9$ o intervalo mais crítico. Analisando a Figura 5(b), nota-se como os valores máximos da correlação ultrapassam o r_{lim} para todos os valores de p e pioram seus valores a partir de $p > 0,9$. Na Figura 5(a) a correlação cruzada aumenta ao incrementar a probabilidade de não chaveamento, mostrando ter certa proporcionalidade.

Ao repetir o estudo, mantendo o comprimento e as sementes utilizadas para gerar as sequências dos sinais, mas usando o dobro do tempo mínimo de não chaveamento ao gerar os sinais, foram obtidos os resultados vistos na Figura 6.

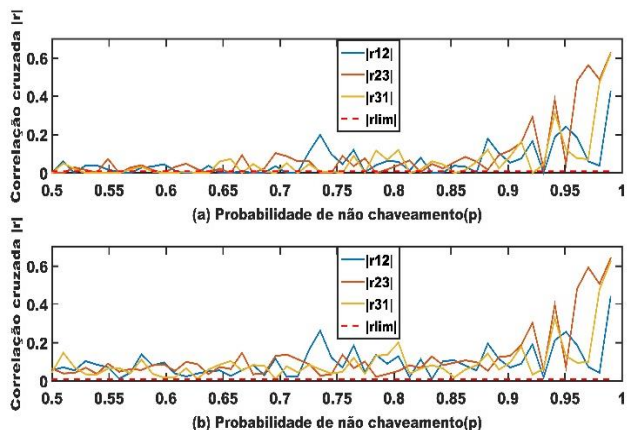


Figura 6 Valores absolutos da correlação cruzada para as 3 combinações de sinais para o *Shell HOF* quando o tempo mínimo de chaveamento vale 200 min. (a) mínimos, (b) máximos.

Os valores obtidos para $T_{min}=200$ min são bem similares aos da Figura 5 ($T_{min}=100$ min), pois para $p > 0,7$ os valores das correlações cruzadas entre os sinais aumentam consideravelmente, piorando para $p > 0,9$, tanto para os valores mínimos da Figura 6(a), como para os máximos da Figura 6(b). Ao duplicar T_{min} , os valores máximos da correlação obtidos aumentam de 0,4 (Figura 5) para 0,6 (Figura 6) aproximadamente, con-

cluindo-se que tanto o aumento de p como de T_{min} aumentam a correlação cruzada entre os sinais de entrada estudados.

Para o estudo do sistema FCC foram geradas 15 combinações entre as 6 entradas do sistema para os 51 conjuntos de sinais, onde cada conjunto foi obtido ao aumentar p em 0,0098, desde $p=0,5$ até $p=0,998$. A Figura 7 exibe os valores das correlações cruzadas das 15 combinações geradas a partir das 6 entradas do sistema *FCC*. Como no sistema anterior, os valores mínimos na Figura 7(a) não ultrapassam o limite da correlação até certo valor de p , neste caso $p=0,75$; e os valores máximos na Figura 7(b) são maiores que o limite para todos os valores de p . Nos dois casos nota-se como a correlação cruzada aumenta consideravelmente a partir de cerca de $p=0,85$.

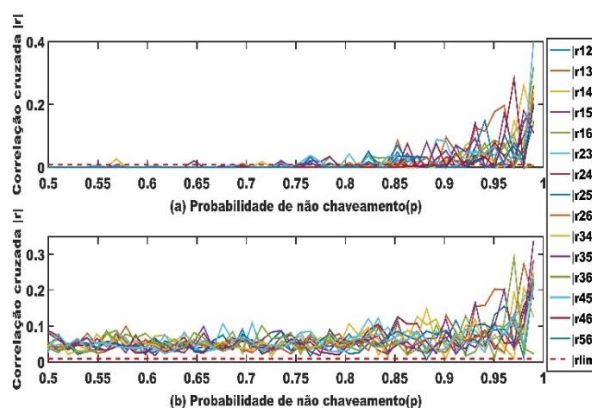


Figura 7: Valores absolutos da correlação cruzada para as 15 combinações de sinais para o *FCC HOF* quando o tempo mínimo de chaveamento vale 40 min, (a) mínimos (b) máximos.

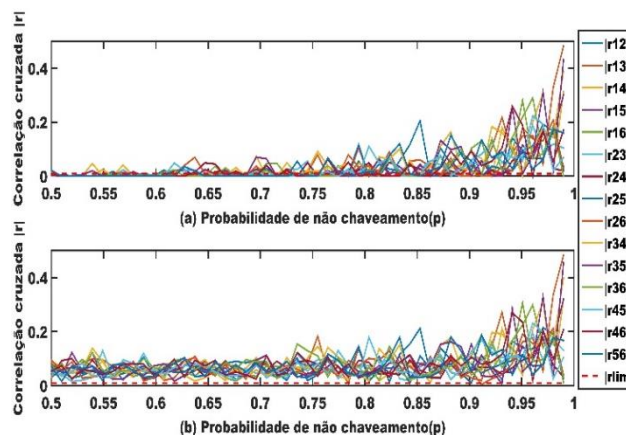


Figura 8: Valores absolutos da correlação cruzada para as 15 combinações de sinais para o *FCC HOF* quando o tempo mínimo de chaveamento vale 80 min, (a) mínimos (b) máximos.

A duplicação de T_{min} aumentou os valores máximos das correlações dos sinais de 0,4 (Figura 7) para 0,5 (Figura 8) aproximadamente, para o sistema FCC. O comportamento dos valores mínimos e máximos foi similar ao anterior: crescem ao aumentar o valor de p e a partir de $p=0,85$ aproximadamente, aumentam mais rápido. Para o estudo da correlação múltipla dos sinais para os dois sistemas estudados, foram calculados os valores de R^2 mediante (8), dependendo do número de variáveis de entrada, 3 ou 6.

Ao calcular a correlação múltipla entre 3 sinais (*Shell HOF*) ou 6 sinais (*FCC*), é obtido um vetor de R^2 para cada um dos

51 conjuntos de sinais gerados para cada benchmark. Tomando o valor médio de cada vetor, foi possível gerar os gráficos a seguir: as Figuras 9 e 10 apresentam os resultados para os quatro estudos realizados, sinais com $T_{min}=100$ min e $T_{min}=200$ min e sinais com $T_{min}=40$ min e $T_{min}=80$ min para o sistema *Shell HOF* e para o sistema *HOF*, respectivamente.

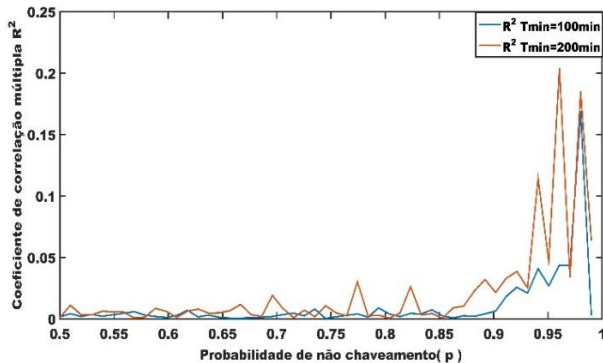


Figura 9: Média dos valores da correlação múltipla para o *Shell HOF*.

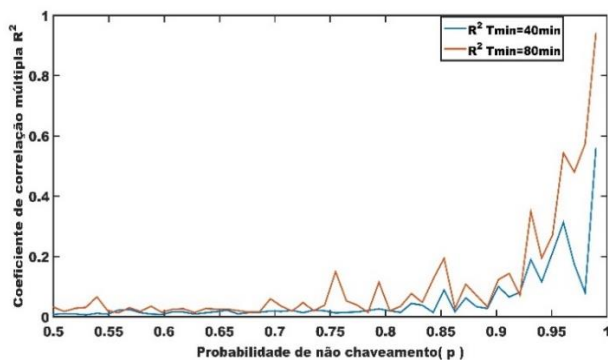


Figura 10 Média dos valores da correlação múltipla para o *FCC HOF*.

Os resultados apresentados nas Figuras 9 e 10 mostram como a correlação múltipla aumenta à medida que aumenta a probabilidade de não chaveamento e o tempo mínimo de chaveamento ao gerar os sinais *GBN*, em cada um dos sistemas estudados. Nos dois casos de estudo, os valores de R^2 relativamente bons encontram-se no intervalo de $p=0,6$ até $p=0,75$.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho aborda um estudo das correlações entre os sinais de excitação de dois benchmarks industriais, uma unidade de 3×7 *HOF* e uma unidade 6×7 *FCC*. O efeito de aumentar a probabilidade de não chaveamento, bem como o tempo mínimo de chaveamento em sinais *GBN* gerados para identificar os sistemas de estudo, provocou um aumento da correlação cruzada e da correlação múltipla entre os sinais de entrada.

Resultou interessante a exibição gráfica de um conjunto de valores de probabilidades de não chaveamento, que permitem gerar sinais de excitação com valores razoáveis de correlação e que permitem atribuir a uma entrada um efeito observado em alguma saída pelo método de identificação usado.

Trabalhos futuros irão comparar os valores de p obtidos neste trabalho, com valores de p obtidos por outros métodos e usar os sinais gerados na identificação dos modelos estudados.

REFERÊNCIAS

- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (1991). Stationary Time Series (pp. 1–41).
- Darby, M. L., & Nikolaou, M. (2014). Identification test design for multivariable model-based control: An industrial perspective. *Control Engineering Practice*, v.22, p.165-180.
- de la Barra, B. A. L., Jin, L., Kim, Y. C., & Mossberg, M. (2008). Identification of First-Order Time-Delay Systems using Two Different Pulse Inputs. *IFAC Proceedings*, 41(2), p. 14366-14371.
- Grosdidier, P., Mason, A., Aitolahti, A., Heinonen, P., & Vanhamäki, V. (1993). FCC unit reactor-regenerator control. *Computers and Chemical Engineering*, 17(2), p. 165-179.
- Hung, N. T., Ismail, I., Saad, N. B., Tufa, L., & Irfan, M. (2015). Design of optimal GBN sequences for identification of MIMO systems. 10th Asian Control Conference: Emerging Control Techniques for a Sustainable World, ASCC 2015.
- Kuramoto, A. S. R. (2012). Projeto de sinais de excitação para identificação multivariável de plantas industriais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Ljung, L. System Identification: Theory for the User, 2nd Edition, 1999, Editora Pearson.
- Morales Vallejo, P. (2011). Correlación y regresión , simple y múltiple. Apuntes de Facultad de Ciencias Humanas y Sociales.UP Comillas.
- Pearson, R. K. (1999). Discrete-time Dynamic Models. Topics in chemical engineering, Oxford University Press, New York. In Oxford University Press.
- Prett, D. M., & Morari, M. (1987). Introduction to Shell Control Problem. In *The Shell Process Control Workshop* (p. 351–362).
- Söderström, T., & Stoica, P. (1989). System Identification, Editora Prentice Hall.
- Tan, A. H., & Godfrey, K. R. (2002). The generation of binary and near-binary pseudorandom signals: An overview. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(4), p. 583-588.
- Tan, A. H., Godfrey, K. R., & Barker, H. A. (2005). Design of computer-optimized pseudorandom maximum length signals for linear identification in the presence of nonlinear distortions. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54(6), p. 2513-1519.
- Tulleken, H. J. A. F. (1990). Generalized binary noise test-signal concept for improved identification-experiment design. *Automatica*, 26(1), p. 37-49.
- Wahyudi, Martasia, S., Setiyono, B., & Setiawan, I. (2018). Design of Auto-tuning Relay Feedback controller for Shell Heavy Oil Fractionator. *MATEC Web of Conferences*, v. 218.
- Yu, Z. H., Li, W., Lee, J. H., & Morari, M. (1994). State estimation based model predictive control applied to shell control problem: a case study. *Chemical Engineering Science*, 49(3), p. 285-301.