

MODELO DE UM CONTROLE DE NÍVEL DE SÓLIDOS EM SILOS USANDO SISTEMAS FUZZY EMBARCADO EM CLP INDUSTRIAL

JOSÉ PINHEIRO DE MOURA*, JOÃO VIANA DA FONSECA NETO†

* *Universidade Estadual do Maranhão
Centro de Ciências Tecnológicas
Departamento de Física
São Luís, Maranhão, Brasil*

† *Universidade Federal do Maranhão
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Elétrica
São Luís, Maranhão, Brasil*

Emails: josepinheiro@cct.uema.br, viana.fonseca@gmail.com

Abstract— Mostly, the industrial processes are very complexes and hard to be modeled mathematically, using the methodology of Fuzzy Logic, it can develop an efficient control for plants which its process and control variables are not possible to be completely represented by mathematical models. This work shows a very important theme, that is, Fuzzy Logic applied to industrial Programmable Logic Controller (PLC), however it is seldom used in practice. On this paper, a controller was developed using Fuzzy Logic to do a control of solids level in silos to be implemented in industrial PLC.

Keywords— Industrial Processes, Fuzzy Logic, Efficient Control, Control Variables, Programmable Logic Controller.

Resumo— Os processos industriais são na maioria das vezes muito complexos e difíceis de serem modelados matematicamente, usando a metodologia lógica *fuzzy*, pode-se desenvolver um controle eficiente para plantas onde suas variáveis de processos e de controles não são possíveis de serem representadas na íntegra por modelos matemáticos. Este trabalho aborda um tema muito importante que é a Lógica *Fuzzy* aplicada em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) industriais, mas muito pouco utilizado na prática. Neste artigo foi desenvolvido um controlador usando lógica *fuzzy* para fazer o controle de nível de sólidos em silos à ser implementado em CLPs industriais.

Palavras-chave— Processos Industriais, Lógica Fuzzy, Controle Eficiente, Variáveis de Controle, Controladores Lógicos Programáveis.

1 Introdução

O controle de nível de sólido usando lógica *fuzzy* tem a vantagem de permitir um controle de nível eficiente dispensando modelos matemáticos mais sofisticados.

Devido as irregularidades geométricas formadas por sólidos, torna-se praticamente impossível desenvolver modelos matemáticos que retratem a realidade da planta (de Moura et al., n.d.). Neste trabalho foi desenvolvido um controlador usando lógica *fuzzy* para fazer o controle de nível de minério de ferro em silos de Viradores de Vagões (VVs) do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) da Vale S.A. em São Luís - Ma.

Automação industrial é amplamente baseada em sistemas de controle embarcados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). CLPs são atualmente programados usando o padrão de linguagens da norma *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61131 que ainda não está pronto para enfrentar os novos desafios de sistemas de controle de automação amplamente distribuídos (Basile et al., 2013). Em complemento ao padrão da norma (IEC) 61131 foi elaborado o padrão da norma IEC 61499 que

aborda a linguagem de programação em bloco de funções, esta fornece uma implementação independente do padrão de controle distribuído (Sunder et al., 2006) e (Black and Vyatkin, 2010). A vantagem do padrão IEC 61499 é a introdução da ordem de execução baseada em eventos para a unidade de organização do programa e a desvantagem, é que o padrão 61499 é muito diferente do padrão IEC 61131 exigindo, portanto, um conhecimento mais especializado, com isso, têm poucas implementações em CLPs industriais (Thramboulidis, 2009).

A Lógica *Fuzzy* foi desenvolvida em 1965 por Lotfi A. Zadeh, professor de Ciência da Computação na Universidade da Califórnia em Berkeley. A lógica *fuzzy* é uma extensão da convencional (booleana) que manipula o conceito de verdade parcial, valores de verdade entre **completamente verdadeiro** e **absolutamente falsa**. A teoria dos conceitos *fuzzy* e lógica *fuzzy* podem ser usadas para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano é capaz de articular estratégia de ação como um conjunto de regras da forma **SE ... ENTÃO** que pode ser implementado em um computador através de um algoritmo. O resultado é um sistema

baseado em regras de inferência, em que a teoria dos conjuntos *fuzzy* e lógica *fuzzy* fornecem as ferramentas matemáticas para lidar com tais regras linguísticas (Jang et al., 1997).

A função "Lógica Fuzzy" já está embarcada em alguns CLPs industriais, a qual está presente, sendo necessário criar um bloco de funções e desenvolver um modelo com lógica *fuzzy* para ser inserido no programa de controle do CLP. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um controlador usando lógica *fuzzy* para fazer o controle de nível de minério em silos de Viradores de Vagões (VVs) para serem implementados em CLPs e como objetivos específicos, examinar a ação principal dos efeitos de controles nos CLPs atuais, tais como: atribuir valores práticos para cada efeito; ver o efeito dos reajustes que cada um tem para o controle final e estabelecer um método para se chegar rapidamente as definições ótimas de cada efeito de controle.

A lógica *fuzzy* pode ser usada para implementar controladores, aplicado em diversos tipos de processos. Esta metodologia incorpora a maneira humana de pensar em um sistema de controle, comportando-se de forma semelhante a um raciocínio dedutivo, controle de processos industriais com características não lineares através de experimentos e inferências de relações entre as variáveis descritas no controlador da planta industrial. O uso de regras *fuzzy* em sistema de controle, têm como vantagens: Simplificação do modelo do processo; Melhor tratamento das imprecisões inerentes aos sensores utilizados; Facilidade na especificação das regras de controle em linguagem próxima à natural; Satisfação de múltiplos objetivos de controle e Facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos.

2 Contribuição deste artigo

A principal contribuição deste artigo, é a aplicação da metodologia Lógica *Fuzzy* em CLPs industriais.

3 Descrição da Planta

Os silos dos VVs compõem um papel importante no processo de descarga dos trens carregados com minério de ferro. Os silos funcionam como um depósito provisório e garantem a disponibilidade de material para os alimentadores das linhas de descarga permitindo a operação contínua dos VVs. No entanto, as dimensões construtivas dos silos restringem a capacidade de acúmulo máximo equivalente a carga de 8 vagões (800 ton.) e de acordo com a especificação de projeto o nível deve ser mantido dentro de uma faixa mínima de 200 ton. e máxima de 800 ton. para proteção dos alimentadores e dos balancins do giro. Por outro lado o formato do silo, sua construção, o ambiente agressivo e o acúmulo de material em suas paredes difi-

cultam a medição do nível por instrumentos normalmente utilizados para esta finalidade.

A manutenção do nível nos silos acima do limite superior máximo de operação interrompe o funcionamento do VV até atingir o nível normal de operação, com isso evita o transbordo de material contido nos silos e consequente quebra e/ou empeno dos componentes da estrutura do barril dos VVs. Como apresentado na Figura 1.



Figura 1: Silo Cheio (80%).

A estrutura do silo dos VVs é um ambiente com muito material em suspensão e água durante o processo de descarga e apresenta características físicas que dificultam o uso de tecnologias normalmente utilizadas para medição de nível de sólidos em silos.

Dentre as particularidades, pode-se citar:

- Os silos dos VVs são formados por dois segmentos, o superior em concreto e o inferior em metal. O segmento inferior é fixado no segmento superior de concreto. Este tipo de estrutura dificulta a medição por meios de sensores convencionais como extensômetros¹, já que não é possível realizar a medição no segmento de concreto e o segmento de metal é fixado na parte superior, tornando a medição complexa;
- A posição de instalação do barril e a distância do mesmo ao silo dificultam a instalação de instrumentos que utilizam o princípio de emissão e reflexão de ondas que possuem um ângulo de abertura pequeno ($< 15^\circ$), pois não conseguem captar toda a extensão do silo, e necessitam ser instalados ortogonalmente à superfície do material. Exemplos: Radar 1D e sensores ultrassônicos.

Os níveis dos silos são medidos por dois radares 2D (iDRR) instalados nas laterais do VV,

¹É um transdutor capaz de medir deformações de corpos. Quando um material é deformado sua resistência elétrica é alterada e a fração de mudança na resistência é proporcional à fração de mudança no comprimento do material.

as medidas são enviadas em tempo real para um CLP industrial para serem tratadas e por meio destas as regras do controlador *fuzzy* são elaboradas (Winkel et al., 2011) e (Neumann et al., 2015).

4 Desenvolvimento do Sistema

O sistema foi desenvolvido para ser implementado em CLP industrial, usando a linguagem *Sequential Function Charts* (SFC) e *Function Block* (FB) de acordo com os padrões IEC 61131 e IEC 61499.

Para medição do nível nos silos foram instalados dois radares iDRR 2D e feita a comparação das medições dos radares iDRR 2D com as medições de um sensor convencional ultrasônico 1D.

A  rea de cobertura do radar iDRR 2D é muito mais abrangente do que a área do sensor ultrasônico 1D. De acordo com essa avaliação, foi usado o radar iDRR 2D para a coleta de dados e configuração das regras do sistema *fuzzy* desenvolvido.

4.1 Instalação do Radar iDRR 2D

A definição dos pontos de instalação dos instrumentos levou em consideração o comportamento da superfície do material durante o esvaziamento dos silos, os pontos críticos de medição e o acesso ao instrumento para a manutenção. Uma vez que o instrumento não necessita ser instalado ortogonalmente ao material a ser medido, decidiu-se instalá-lo em pedestais no mesmo patamar do piso superior externo na lateral do silo e fora da estrutura do barril do giro do VV. Conforme ilustrado na Figura 2.

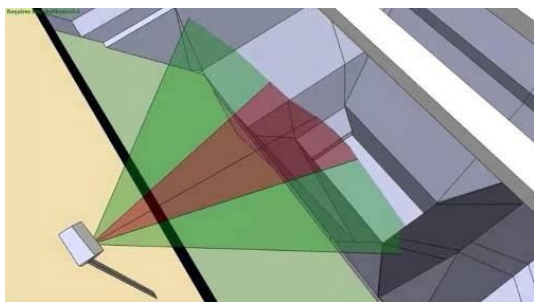


Figura 2: Faixa de medição do instrumento no silo.

4.2 Descrição da Rotina do Processo do Nível dos Silos dos VVs

O acionamento dos alimentadores é feito por dois motores de corrente alternada (CA) de 500cv cada um. O comando é dado de uma Interface Homem Máquina (IHM) para o CLP que aciona os inversores de frequências que controlam a velocidade de rotação dos motores dos alimentadores, conforme ilustrado na Na Figura 3.

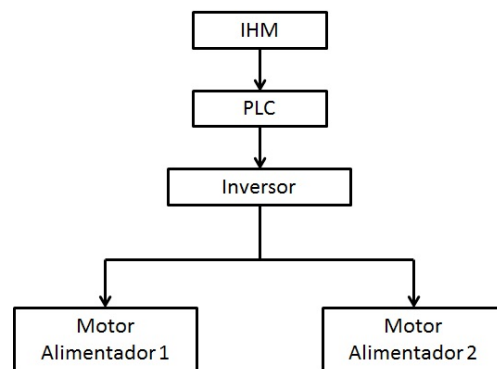


Figura 3: Esquema de acionamento dos motores dos alimentadores do VV.

4.3 Diagrama de Blocos do Processo do Nível dos Silos dos VVs

Os silos dos VVs são abastecidos para manter um fluxo de carga constante durante o processo operacional, para isso é necessário manter um nível de carga adequado dentro dos silos para que os alimentadores funcionem sem que ocorra atuação constante de nível mínimo ou de nível máximo. O controle de nível é feito por meio da variação da velocidade dos alimentadores, estes recebem informações dos radares iDRR 2D que medem o nível dentro dos silos, essas informações são registradas no CLP para o tratamento adequado. Conforme ilustrado na Figura 4

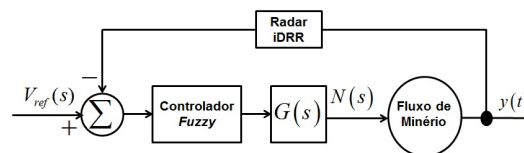


Figura 4: Diagrama de Blocos do Processo do Nível dos Silos dos VVs.

onde, V_{ref} = valor de referência dos inversores em porcentagem; $N(s)$ = nível dos silos; *Fluxo de Minério* = a vazão dos alimentadores em toneladas por hora (t/h) e o radar iDRR o sensor que mede o nível dos silos.

4.4 Rotina do Processo do Controle de Nível dos Silos dos VVs

Rotina do processo de controle de nível dos silos dos VVs:

- 1) passo - Abastece os silos;
- 3) passo - Entra com o valor de referência dos inversores de frequências em porcentagem;
- 2) passo - Liga os motores dos alimentadores.

Na Figura 5 está ilustrado de forma macro o processo de controle de nível dos silos dos VVs.

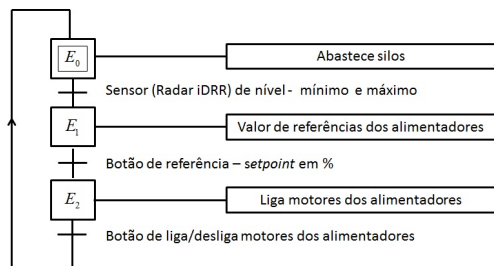


Figura 5: Grafcet em nível descritivo do processo de controle de nível dos Silos dos VVs.

Para cada elemento de entrada ou saída do processo de descarga de vagões, deve ser associada a um endereço físico correspondente no CLP. Para cada uma das etapas é atribuído um *bit* de memória auxiliar do CLP. O mesmo é feito para cada uma das transições.

Tabela 1: Receptividades (entradas).

Nível Comport.	Nível Tecnológ.	Descrição
b_1	I_2	Bot. de part. M. alim.
b_2	I_1	Bot. valor de ref.
s_1	I_3	Sensor de nível - min.
s_2	I_4	Sensor de nível - max.

4.5 Modelagem do Sistema

O sistema foi modelado para manter o rendimento desejado durante o processo de descarga dos VVs, de acordo com o tipo de minério, levando em conta as características físicas e químicas do material (Ljung and Söderström, 1983) e (Ljung, 1998).

Neste trabalho foram testados dois tipos de minérios de ferro *Sinter Feed* Carajás (SFCJ) e *Pellet Feed* Carajás (PFCJ) com diferentes características físicas. Como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Comportamento da produtividade de SFCJ e PFCJ.

Tipo de Minér.	Densid. (ton/m ³)	Âng. de Rep.	Ref. dos Inv. (%)	Taxa (ton/h)
SFCJ	2,7	45	30	4000
SFCJ	2,7	45	35	5000
SFCJ	2,7	45	40	6000
SFCJ	2,7	45	50	7000
SFCJ	2,7	45	55	8000
SFCJ	2,7	45	60	9000
SFCJ	2	45	65	10000
PFCJ	2	40	30	2963
PFCJ	2	40	35	3700
PFCJ	2	40	40	4500
PFCJ	2	40	45	5200
PFCJ	2	40	50	6000
PFCJ	2	40	55	6700
PFCJ	2	40	60	7400

4.6 Controle Fuzzy Aplicado em PLC

Atualmente, na indústria é possível perceber o uso de controladores *fuzzys* em CLPs isolados ou como parte de um sistema de produção integrada e complexa. Controle *fuzzy* é baseado em regras que são capazes de lidar com a incerteza sobre a informação de plantas reais (Bolton, 2015).

Na validação deste trabalho foi utilizado um CLP *Controllogix5000*, no qual tem um bloco disponível para o desenvolvimento e implementação da lógica *fuzzy*, em que os elementos adicionais denominados *fuzzificador* e *defuzzificador* estão presentes, posicionados na entrada e saída do sistema de controle, respectivamente. Esses elementos têm função de transformar as medidas obtidas dos radares iDRR em conjuntos *fuzzy* (*fuzzificador*) e em transformar os conjuntos obtidos na saída do controlador em valores que pertençam aos sistemas analógicos de controle para o processo defuzzificação.

A vantagem de se desenvolver um módulo *fuzzy* em CLP para fazer o controle de nível em silos de sólidos consiste em se obter uma maior eficiência na execução do código, agregando valor às aplicações desenvolvidas e incorporar a habilidade de controle de sistemas não-lineares.

As leituras do radar *iDRR* quanto os sinais esperados pelos atuadores do sistema de controle não pertencem à linguagem da lógica implementada no CLP, fazendo-se necessário a conversões da lógica aritmética para que a lógica *fuzzy* seja realizada.

4.7 RSLogix 5000 Software

O desenvolvimento de soluções de lógica *fuzzy* no RSLogix 5000 consiste das seguintes etapas: projetar o sistema *fuzzy*; gerar a instrução *fuzzy Add-On instruction* (AOI); integrar (importação e instanciar) da AOI *fuzzy* para o projeto RSLogix 5000; monitorar e ajustar AOI *fuzzy* em execução. Na Figura 6 está ilustrada alguns componentes da biblioteca de objetos do RSLogix 5000.



Figura 6: Biblioteca de objetos do RSLogix 5000.

5 Resultados

As regras foram construídas para se obter a produtividade desejada no processo de descarga de vagões, na validação do controlador *fuzzy*, foram

escolhidos dois tipos de minérios de ferro (SFCJ e PFCJ) com características físicas diferentes, na Figura 7 está ilustrado os conjunto de regras implementados no CLP de um VV para o SFCJ.

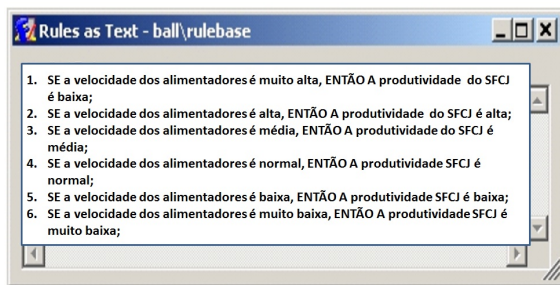


Figura 7: Exemplos de regras para o SFCJ.

Na Figura 8 está ilustrado o comportamento da produtividade do SFCJ sem o controlador *fuzzy*. É observado que a medida que a velocidade dos alimentadores aumenta, a produtividade aumenta proporcional até um certo limite de velocidade, porém quando a velocidade dos alimentadores aumenta muito, a produtividade baixa, tendo um comportamento inversamente proporcional à velocidade dos alimentadores. Isso ocorre porque os silos esvaziam muito rápido, com isso, num determinado momento a taxa horária é muito alta, mas logo acaba a carga dos silos e consequentemente o sistema fica funcionando em vazio, ocasionando uma produtividade nula nesse intervalo de tempo.

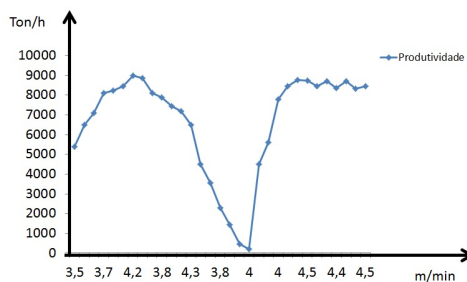


Figura 8: Produtividade do SFCJ sem o controlador *fuzzy*.

Na Figura 9 está ilustrado o comportamento da produtividade do SFCJ com o controlador fuzzy implementado no CLP do VV. Observou-se que a variação da taxa horária diminuiu, evitando intervalos de funcionamento dos alimentadores sem carga, com isso a produtividade aumentou de 7350 tond/h para 7870 tons/h.

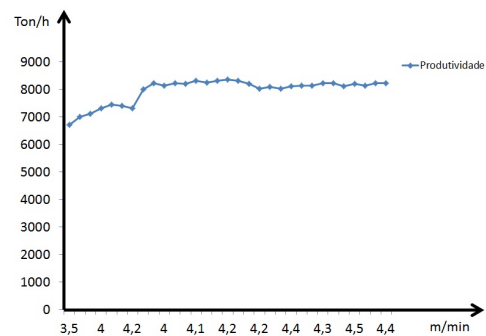


Figura 9: Produtividade do SFCJ com o controlador *fuzzy*.

Na Figura 10 está ilustrado o comportamento da produtividade para o PFCJ sem o controlador *fuzzy*. É observado que a medida que a velocidade dos alimentadores aumenta, a produtividade também aumenta proporcionalmente a velocidade dos alimentadores até atingir a capacidade máxima do equipamento. Isso ocorre porque PFCJ tem a densidade menor do que a densidade do SFCJ, consequentemente os silos continuam cheios, mantendo assim a produtividade alta, porém o ciclo de operação do VV é interrompido diversas vezes para aguardar os silos esvaziarem, com isso há uma variação no vazão da carga e consequentemente um redução na produtividade.

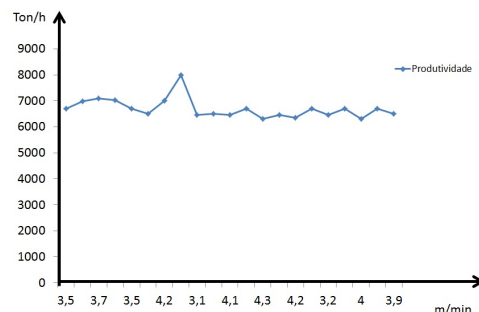


Figura 10: Comportamento da produtividade do PFCJ sem o controlador *fuzzy*.

Na Figura 11 está ilustrado o comportamento para o PFCJ com o controlador *fuzzy*. É observado que a medida que a velocidade dos alimentadores aumenta, a produtividade também aumenta proporcionalmente a velocidade dos alimentadores até atingir a capacidade máxima do equipamento. Já com o controlador *fuzzy* implementado o nível dos silos é mantido dentro dos parâmetros estabelecidos no desenvolvimento deste trabalho, com isso o ciclo do de operação do VV é sincronizado com a vazão dos silos, mantendo o VV em funcionamento sem interrupções, consequentemente a produtividade teve um aumento de 6640 ton/h para 7380 ton/h.

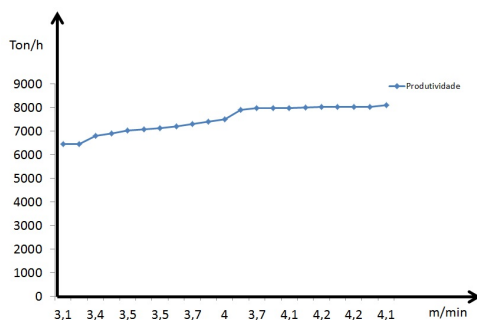


Figura 11: Comportamento da produtividade do PFCJ com o controlador *fuzzy*.

Os resultados obtidos neste trabalho foram realizados em primeira instância com simulações em *MATLAB* e numa segunda instância com a implementação da lógica *fuzzy* no CLP *Controllogix 5000* de um VV com a adição de um bloco de função com as regras *fuzzy* acoplada a lógica do programa do VV em linguagem *LADDER*. Como na prática, os níveis dos silos não se comportam de forma linear para os dois produtos analisados. Os dois tipos de minérios: SFCJ e PFCJ, foram analisados independentes.

O comportamento da produtividade SFCJ foi aumentando gradualmente até que as velocidades dos alimentadores atingissem 4 m/min, após a velocidade ultrapassar 4 m/min a produtividade teve uma redução em função dos silos esvaziarem e parte do tempo operado funcionarem sem carga. Já para o PFCJ a produtividade foi aumentando gradativamente com o aumento da velocidade dos alimentadores, até atingir a capacidade máxima do equipamento e manteve-se constante, isso ocorreu porque o PFCJ tem a densidade menor do que a densidade do SFCJ, em consequência disso os silos permaneceram com carga o tempo integral do funcionamento do sistema produtivo.

6 Conclusões

De acordo com as análises apresentadas na seção anterior, observou-se que o controle de nível de sólidos em silos de VV pode ser feito por um controlador inteligente desenvolvido com uso de lógica *fuzzy* aplicado em CLPs industriais. Portanto, conclui-se que o radar iDRR associado ao controlador *fuzzy* concebido com as regras criadas com base no comportamento real do processo produtivo atendeu a expectativa, que era manter o nível mínimo de material no silos e garantir a produtividade desejada.

Agradecimentos

Agradecemos a empresa Vale S.A., por fornecer a planta e seus especialistas para testes e validação deste Trabalho; também agradecemos a Uni-

versidade Estadual do Maranhão por apoiar esta pesquisas e a Universidade Federal do Maranhão pelos ensinamentos teórico e práticos na concepção deste trabalho.

Referências

- Basile, F., Chiacchio, P. and Gerbasio, D. (2013). On the implementation of industrial automation systems based on plc, *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* **10**(4): 990–1003.
- Black, G. and Vyatkin, V. (2010). Intelligent component-based automation of baggage handling systems with iec 61499, *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on* **7**(2): 337–351.
- Bolton, W. (2015). *Programmable logic controllers*, Newnes.
- de Moura, J. P., de Oliveira Serra, G. L. and da Fonseca, J. V. (n.d.). (2013). logica fuzzy no controle de embarque de navios no terminal marítimo de ponta da madeira.
- Jang, J.-S. R., Sun, C.-T. and Mizutani, E. (1997). Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence [book review], *Automatic Control, IEEE Transactions on* **42**(10): 1482–1484.
- Ljung, L. (1998). *System identification*, Springer.
- Ljung, L. and Söderström, T. (1983). Theory and practice of recursive identification.
- Neumann, K., Berg, J., Eichentopf, B., Mehner, P., Nienhaus, K., Sauter, T., Rabel, M., Hammer, F. and Pichler, M. (2015). Featureface—an innovative collision avoidance system for the underground mining industry, *Application of computers and operations research in the mineral industry: proceedings of the 37th International Symposium: APCOM*, pp. 767–784.
- Sunder, C., Zoitl, A. and Dutzler, C. (2006). Functional structure-based modelling of automation systems, *International Journal of Manufacturing Research* **1**(4): 405–420.
- Thramboulidis, K. (2009). Different perspectives [face to face;”iec 61499 function block model: Facts and fallacies”], *Industrial Electronics Magazine, IEEE* **3**(4): 7–26.
- Winkel, R., Augustin, C. and Nienhaus, K. (2011). 2d radar technology increasing productivity by volumetric control and hopper car positioning in brown coal mining, *Górnictwo i Geoinżynieria* **35**: 273–289.