

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Leonardo das Dores Cardoso

SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE E COMISSONAMENTO  
EM SISTEMAS DE MANUFATURA

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Novembro de 2013

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Leonardo das Dores Cardoso

SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE E COMISSIONAMENTO  
EM SISTEMAS DE MANUFATURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Orientador: Prof. João José de Assis Rangel, D.Sc.

Coorientador: Prof. Ítalo de Oliveira Mathias, D.Sc.

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Novembro de 2013

LEONARDO DAS DORES CARDOSO

SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE E COMISSIONAMENTO  
EM SISTEMAS DE MANUFATURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional, da Universidade Candido Mendes – Campos/RJ, para obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada em 8 de Novembro de 2013.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. João José de Assis Rangel - Orientador  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Ítalo de Oliveira Mathias  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Dalessandro Soares Vianna  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Alexandre Ferreira de Pinho  
Universidade Federal de Itajubá

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Novembro de 2013

## RESUMO

### SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE E COMISSIONAMENTO EM SISTEMAS DE MANUFATURA

A simulação a eventos discretos, tradicionalmente utilizada para análise durante a concepção de projetos, tem se apresentado como uma abordagem potencial para auxiliar a etapa de comissionamento de sistemas. Existe uma série de trabalhos que apresentam a utilização desta abordagem como uma tendência no comissionamento de sistemas de manufatura. Porém, em plantas mais complexas é necessário um grande esforço para se obter uma representação realística do sistema utilizando a simulação a eventos discretos convencional. Por outro lado, a modelagem individual de estações do processo não possibilita analisar a interação desta com a planta. Desta forma, o presente trabalho utiliza simulação a eventos discretos e estações de manufatura como um ambiente híbrido de emulação para desenvolvimento e teste de sistemas de controle. Para desenvolvimento do modelo foi utilizado um software código aberto, chamado URURAU, que permite a integração do modelo desenvolvido ao sistema através de um servidor de comunicação OPC. A utilização desta abordagem permite que se utilize parte do sistema real, proporcionando um maior realismo ao ambiente de teste. Além disto, propõe-se que o modelo desenvolvido na etapa de concepção seja modificado para que possa ser utilizado durante a etapa de desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão, posteriormente na etapa de comissionamento e, ainda, para treinamento de operadores. Para testar a abordagem proposta utilizou-se uma planta de manufatura didática composta por quatro estações, onde uma das referidas estações foi considerada como inexistente. Realizou-se então um projeto de implementação desta nova estação utilizando a abordagem proposta. A abordagem se mostrou adequada e através desta foi possível desenvolver o sistema de controle e supervisão de forma mais interativa. Além de detectar falhas no sistema de controle que poderiam danificar o sistema e apresentar risco aos operadores. Além disso, pode ser utilizado para treinamento de operadores sem comprometer o correto funcionamento do sistema real, possibilitando simular situações de falhas potenciais durante o treinamento destes. Por outro lado, uma alternativa que se apresentou durante a realização do presente trabalho foi a perspectiva de ser utilizar o mecanismo híbrido de teste como uma ampliação das possibilidades de sistemas a serem utilizados no ensino de sistemas de controle.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação a eventos discretos, Comissionamento híbrido, Emulação, Sistemas de controle, Plantas de manufatura.

## ABSTRACT

### A DISCRETE EVENT SIMULATION TO ANALYSIS AND COMMISSIONING OF MANUFACTURING SYSTEMS

A discrete event simulation, traditionally used for analysis during the design of projects, has been touted as a potential approach to assist the commissioning phase systems. There are a number of studies that show the use of this approach as a trend in the commissioning of manufacturing systems. However, in more complex plants requires a large effort to obtain a realistic representation of the system using the conventional discrete event simulation. On the other hand, the individual stations modeling process does not allow to analyze the interaction of this with the plant. Thus, the present work uses discrete event simulation and manufacturing plants as a hybrid emulation environment for development and testing of control systems. For model development we used the software URURAU, it is *open source* software that allows the integration of the developed model to the system through an OPC server. The use of this approach allows using the real system, providing a more realistic test environment. Furthermore, it is proposed that the model developed in step design can be modified to be used during the development stage of control and supervision systems, later in the commissioning phase, and also for training operators. To test the proposed approach used a didactic manufacturing plant consists of four stations, where one of these stations was considered as non-existent. Was then carried out a project to implement this new station using the proposed approach. The approach was adequate and through this it was possible to develop the system of control and supervision more interactively, and to detecting faults in the control system that could damage the system and present a risk to operators. And can be used for operator training without compromising the proper functioning of the real system, making it possible to simulate situations of potential failures during training these. Moreover, an alternative that is presented during the course of the present work was the prospect of using the hybrid mechanism being Test as an extension of the possibilities of systems to be used in teaching control systems.

**KEYWORDS:** Discrete event simulation, Hybrid commissioning, Emulation, Control systems, Manufacturing plants.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de Simulação Discreto	17
Figura 2: Modelo de Simulação Contínua	17
Figura 3: Interface gráfica Arena	22
Figura 4: Interface gráfica Automod	24
Figura 5: Interface gráfica do Ururau	25
Figura 6- Ciclo de vida típico de um projeto	25
Figura 7- Project life cycle	28
Figura 8: Possibilidade da utilização da simulação para sistemas de controle	34
Figura 9: Relação entre a simulação, emulação e o sistema de comunicação	45
Figura 10: Desenho esquemático estações de manufatura	49
Figura 11: Desenho esquemático Estação 1	50
Figura 12: Peças utilizadas no processo (1: metálica grande furada, 2: metálica grande, 3: plástica grande, 4: metálica pequena e 5: plástica pequena)	51
Figura 13: Desenho esquemático Estação 2	52
Figura 14: Desenho esquemático Estação 3	53
Figura 15: Desenho esquemático Estação 4	54
Figura 16: Sistema inicial	55
Figura 17: Arquitetura do Ururau	57
Figura 18: Diagrama de componentes do Ururau	57
Figura 19 Ambiente de desenvolvimento do Ururau	58
Figura 20: Comissionamento convencional	59
Figura 21: Cronologia da execução de projetos	60
Figura 22: Comissionamento virtual	61
Figura 23: Comissionamento Híbrido	62

Figura 24- Diferenças entre o comissionamento tradicional e o virtual	62
Figura 25- Integração modelo de simulação, Ururau e sistema de controle	63
Figura 26- Comunicação OPC do Ururau	64
Figura 27: Comissionamento virtual da Estação 2	66
Figura 28: Esquema da integração do sistema híbrido	66
Figura 29: Esquema híbrido de integração das estações	67
Figura 30: Modelo conceitual Estação 2	68
Figura 31: Modelo computacional em Ururau	74
Figura 32: Esquema das redes de comunicação utilizadas	75
Figura 33: Tela de supervisão Estação 2	75
Figura 34: Diagrama Ladder Estação 2	76
Figura 35- Erro individual Estação 1	78
Figura 36- Erro interação Estações 1 e 2	80

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tabela ano de publicação, autor e periódico/congresso de publicação	29
Quadro 2: Tabela descritiva modelo conceitual Estação 2	71
Quadro 3: Erros inseridos no programa de controle	77
Quadro 4: Erros detectados x teste realizado	80

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OLE - Object Linking and Embedding

OPC – OLE for Process Control;

FOOS – Free *Open source* Software

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	OBJETIVO GERAL	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4	JUSTIFICATIVA E CONSIDERAÇÕES	14
1.5	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	15
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>16</b>
2.1	REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
2.1.1	<b>Simulação</b>	16
2.1.2	<b>Simulação e emulação</b>	20
2.1.3	<b>Softwares de simulação</b>	21
2.1.3.1	ARENA	22
2.1.3.2	AUTOMOD	23
2.1.3.3	URURAU	24
2.1.4	<b>Ciclo de vida de projetos</b>	25
2.1.5	<b>Comissionamento de sistemas industriais</b>	27
2.2	ESTADO DA ARTE	28
2.2.1	<b>Metodologia de busca</b>	28
2.2.2	<b>Artigos classificados no período de 1980 a 2000</b>	30
2.2.3	<b>Artigos classificados na década de 2000</b>	34
2.2.4	<b>Artigos classificados na década de 2010</b>	39
2.3	CONCLUSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA	47
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>49</b>

3.1	DESCRIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA	49
3.2	METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	55
3.3	METODOLOGIAS DE COMISSIONAMENTO	58
3.4	COMISSIONAMENTO COM MODELOS DE SIMULAÇÃO	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>65</b>
4.1	ESTRUTURA DE COMISSIONAMENTO PROPOSTA	65
4.1.1	<b>Modelo de simulação (emulador)</b>	67
4.1.2	<b>Sistema de controle e supervisão</b>	75
4.2	DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS	77
4.2.1	<b>Testes preliminares (comissionamento virtual)</b>	77
4.2.2	<b>Testes utilizando o comissionamento híbrido</b>	78
4.3	AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS TESTES	80
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>81</b>
5.1	CONCLUSÕES	81
5.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	82
5.3	TRABALHOS FUTUROS	83
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE A: PUBLICAÇÃO ORIGINADA COM O PROJETO DE PESQUISA</b>	<b>90</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria manufatureira tem passado por profundas modificações, as plantas de processo se tornam cada vez maiores, mais complexas, necessitam de constantes modificações e envolvem cada vez mais pessoas, com um tempo reduzido para a tomada de decisão. Portanto, as indústrias precisam projetar, modificar suas instalações, fabricar novos produtos e entregá-los aos consumidores em um intervalo de tempo cada vez menor (HIBINO, 2002). Neste contexto, diversos autores apresentam abordagens potenciais para auxiliar a tomada de decisão, dentre elas a simulação a eventos discretos.

A simulação a eventos discretos, tradicionalmente utilizada para análise durante a concepção de projetos, tem se apresentado como uma abordagem potencial para auxiliar a etapa de comissionamento de sistemas. Desde o fim da década de 80, trabalhos como Erickson (1987); Hiitchens e Ryan (1989) destacam a possibilidade de utilização desta abordagem para a emulação de processos. Apesar de não apresentarem detalhes da utilização, devido a limitações tecnológicas da época, os autores apresentam a possibilidade de utilizar esta abordagem de forma integrada em diversas etapas do projeto.

Atualmente, autores como Ko *et al* (2013), Diogo *et al* (2012) e Okolnishnikov (2011) apresentam mais detalhes desta aplicação, limitando-a, no entanto, a determinada etapa do projeto. Por outro lado, uma abordagem que tem mostrado potencial aplicabilidade é a utilização de modelos de simulação integrados a uma parte do sistema real, numa aplicação denominada comissionamento híbrido. Esta

permite que apenas a parte do sistema que se deseja analisar, ou a parte do sistema que apresenta risco ao ser utilizada na realização de testes dos experimentos seja modelada, reduzindo o tempo e custo dependido na elaboração do modelo (HARRISON E TILBURY, 2008), (CARDOSO *et al*, 2012) e (CARDOSO *et al*, 2013). Desta forma, a crescente necessidade de modificação das linhas de produção poderia ter uma atenuação no tempo e custo despendido.

Essas constantes modificações geram elevados custos para as empresas, principalmente devido à planta de processo não estar em operação durante a execução das modificações. Desta forma, o presente trabalho propõe a utilização da simulação a eventos discretos como uma ferramenta integrada na execução de projetos de modificação e construção de plantas de processo automatizadas. Neste contexto busca-se utilizar a simulação de forma integrada durante todo o ciclo de vida do projeto. O modelo desenvolvido na etapa de concepção é utilizado durante a etapa de desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão e posteriormente na etapa de comissionamento e, ainda, para treinamento de operadores.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Construir e avaliar um ambiente híbrido composto por modelos de simulação a eventos discretos e estações de manufatura para desenvolvimento e teste de sistemas de controle e supervisão.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o modelo de simulação para análise do novo sistema de manufatura utilizando o software de simulação FOSS URURAU, e executá-lo para auxiliar a etapa de concepção do projeto de modificação do sistema;
- Desenvolver um emulador do novo sistema de manufatura, utilizando o modelo de simulação (análise), e integrá-lo ao sistema de controle utilizando um servidor de comunicação OPC;

- Desenvolver, de modo integrado, os sistemas de supervisão e controle do novo sistema de manufatura utilizando o emulador de processo (modelo de simulação);

#### 1.4 JUSTIFICATIVA E CONSIDERAÇÕES

O trabalho apresentado utiliza uma abordagem que tem como característica principal a execução do projeto de forma mais estruturada, principalmente durante o desenvolvimento e teste do sistema e controle. Isso se dá porque os métodos tradicionalmente utilizados para desenvolvimento e teste de sistemas de controle são basicamente empíricos. Ou seja, o desenvolvimento é realizado de forma experimental e separadamente do sistema físico podendo gerar inconsistências e erros. Estes erros, normalmente, são detectados de forma tardia durante uma das fases mais críticas do projeto, o comissionamento. Durante esta etapa, o sistema físico recém-construído ou modificado é então integrado ao sistema de controle para a realização de testes. A existência de algum erro pode gerar danos aos equipamentos e gerar riscos aos operadores. Além disto, esta é uma das fases finais do projeto, a existência de erros gera grande possibilidade de atrasos consideráveis e a necessidade de reengenharia e modificações no projeto original. Outra possibilidade é de se utilizar parte do sistema real integrada ao emulador formando um ambiente híbrido. Esta abordagem gera a vantagem de não necessitar que toda a planta seja modelada, pode-se, assim modelar apenas a parte que apresenta risco, ou que se deseja analisar.

Sendo assim, o uso da emulação com o modelo de simulação permite que os testes sejam realizados de forma paralela ao desenvolvimento do sistema físico, possibilitando que erros ou inconsistências sejam detectados e corrigidos antes da etapa de comissionamento. Além disto, testes do programa de controle e do sistema de supervisão podem ser realizados durante o desenvolvimento destes, tornando esta tarefa menos empírica. Outra vantagem característica desta abordagem é a possibilidade de utilizar o emulador desenvolvido de ambiente gráfico por meio do próprio sistema de supervisão que será usado para monitoramento do sistema real, para treinamento de operadores.

## 1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O escopo da dissertação delimita-se em um modelo de simulação desenvolvido em software livre e quatro estações piloto de manufatura, integrados através de uma rede de comunicação. Estes, são integrados através de um servidor de comunicação OPC aos sistemas de controle e supervisão, para que o desenvolvimento destes seja feito de forma mais interativa.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, definições e características de tópicos essenciais para o desenvolvimento do trabalho, como simulação, projetos e simulação aplicada ao comissionamento de sistemas de controle.

O capítulo 3 descreve o sistema físico utilizado para a realização de testes da abordagem proposta.

O capítulo 4 apresenta a etapa de realização de testes utilizando o ambiente desenvolvido.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais geradas a partir dos testes realizados.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 REFERÊNCIAL TEÓRICO**

Este item apresenta o conjunto de referências utilizadas no referencial teórico do trabalho.

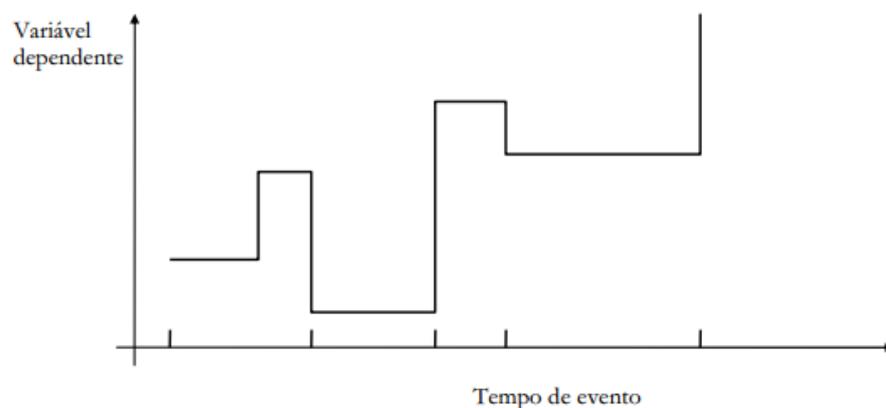
#### **2.1.1 Simulação**

Simulação é a representação de uma operação, seja ela, existente, em fase de projeto, ou até mesmo de um sistema hipotético. Pode ser representada de forma matemática, lógica ou simbólica de modo manual ou computacional, através do desenvolvimento de um modelo que representa o referido sistema, permitindo que este seja analisado sem a utilização do sistema real Banks (2007).

A simulação é utilizada tradicionalmente como uma ferramenta de análise, para prever o efeito de mudanças em sistemas existentes, ou como uma ferramenta de design para prever o desempenho de sistemas ainda em concepção. Uma vez desenvolvido e validado um modelo pode ser utilizado para responder a questões como “e se?”, permitindo que mudanças potenciais possam ser avaliadas. Sendo assim, são utilizadas a fim de prever o impacto de uma alteração no sistema, sem necessitar modificar o sistema real, reduzindo significativamente as incertezas, riscos e custos associados à análise (BANKS, 2007).

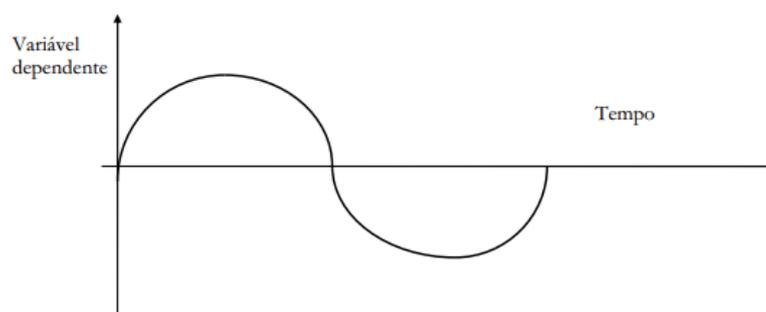
A simulação a eventos discretos diz respeito à modelagem de um sistema no qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos separados do tempo. Ou seja, em termos matemáticos pode-se dizer que o sistema pode mudar

apenas em um número contável de vezes em um intervalo de tempo. Esses pontos no tempo são os únicos em que um evento pode ocorrer, onde um evento é definido como uma ocorrência instantânea que pode mudar o estado do sistema. Embora a simulação de eventos discretos possa conceitualmente ser feita através de cálculos manuais, a quantidade de dados que devem ser armazenados e manipulados pela maior parte dos sistemas do mundo real dita que a simulação de eventos discretos seja feita em um computador digital (LAW, 2007). A Figura 1 apresenta graficamente o comportamento de um sistema discreto no tempo.



**Figura 1: Modelo de Simulação Discreto**  
**Fonte: Mello (2007).**

Já a simulação de sistemas contínuos é caracterizada pela mudança de estado de forma contínua em um intervalo de tempo. A Figura 2 apresenta graficamente o comportamento de um sistema contínuo no tempo (BANKS, 2007).



**Figura 2: Modelo de Simulação Contínua**  
**Fonte: Mello (2007)**

As possíveis aplicações da simulação a eventos discretos apresentadas por Freitas Filho (2008), são:

- Manufatura e montagem;

- Movimentação de peças e matéria-prima;
- Alocação de mão-de-obra;
- Áreas de armazenagem;
- Redes de distribuição e logística;
- Armazém e entrepostos;
- Operações portuárias;
- Transportes rodoviários e ferroviários;
- Operações em aeroportos;
- Redes de computadores e de comunicação;
- Web sites;
- Servidores de redes;
- Arquitetura de computadores;
- Sistemas operacionais;
- Gerenciadores de bases de dados;
- Seguradoras;
- Operadores de crédito e financeiras;
- Hospitais e Bancos;
- Centrais de atendimento (*call centers*);
- Restaurantes industriais e tipo *fast food*;
- Serviços de emergência (polícia, bombeiros, etc.);
- Serviços de assistência jurídica, etc.

Além disto, Freitas Filho (2008) apresenta algumas vantagens e desvantagens do uso da simulação a eventos discretos:

1. Uma vez criado, um modelo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos e políticas propostas;
2. A metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação de um sistema proposto, mesmo que os dados de entrada estejam, ainda, na forma de “esquemas” ou rascunhos.
3. A simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que métodos analíticos.
4. Enquanto que modelos analíticos requerem um número muito grande de simplificações para torná-los matematicamente tratáveis, os modelos de simulação não apresentam tais restrições. Além disso, nos modelos analíticos,

as análises recaem apenas sobre um número limitado de medidas de desempenho. De maneira contrária, as informações geradas pelos modelos de simulação, permitem a análise de, praticamente, qualquer medida concebível.

5. Uma vez que os modelos de simulação podem ser quase tão detalhados quanto os sistemas reais, novas políticas e procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação etc., podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado.
6. Hipóteses sobre como ou por que certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação;
7. O tempo pode ser controlado. Pode ser comprimido ou expandido. Permitindo reproduzir os fenômenos de maneira lenta ou acelerada, para que se possa melhor estudá-los;
8. Pode-se compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação a performance e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema;
9. A identificação de “gargalos”, preocupação maior no gerenciamento operacional de inúmeros sistemas, tais como fluxos de materiais, de informações e de produtos, pode ser obtida de forma facilitada, principalmente com a ajuda visual;
10. Um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos pensam que ele opera;
11. Novas situações sobre as quais se tenha pouco conhecimento e experiência, podem ser tratadas, de tal forma que se possa ter, teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos.

A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: *o que aconteceria se?* Embora as inúmeras vantagens, o processo de simular apresenta algumas dificuldades, como as que são listadas abaixo:

1. A construção de modelos requer treinamento especial. Envolve arte e, portanto, o aprendizado se dá ao longo do tempo, com a aquisição de experiência. Dois modelos de um sistema construídos por dois indivíduos competentes terão similaridades, mas dificilmente serão iguais.
2. Os resultados da simulação são, muitas vezes, de difícil interpretação. Uma vez que os modelos tentam capturar a variabilidade do sistema, é comum que

existam dificuldades em determinar quando uma observação realizada durante uma execução se deve a alguma relação significativa no sistema ou a processos aleatórios construídos e embutidos no modelo.

3. A modelagem e a experimentação associadas a modelos de simulação consomem muitos recursos, principalmente tempo. A tentativa de simplificação na modelagem ou nos experimentos objetivando economia de recursos costuma levar a resultados insatisfatórios. Em muitos casos a aplicação de métodos analíticos (como a teoria das filas, por exemplo) pode trazer resultados menos ricos e mais econômicos.

### **2.1.2 Simulação e emulação**

Como destacado anteriormente, a simulação é tradicionalmente utilizada para análise e concepção de projetos. Porém, na última década diversos autores como Auinger *et al* (1999), Rengelink e Saanen (2002) e Phillips e Montalvo (2010) apontam a possibilidade de utilizar a simulação como uma ferramenta de testes de sistemas de controle. Tal aplicação é possível através da integração de modelos de simulação a sistemas reais, permitindo que parte do sistema real seja utilizada. Assim, parte do sistema não precisa ser simulada reduzindo o tempo de desenvolvimento do modelo. Além disto, um modelo é uma representação simplificada, sendo assim, a utilização de parte do sistema real aumenta consideravelmente a confiabilidade do modelo. Nestes casos o modelo desenvolvido é denominado não simulador, mas emulador.

Mc-Gregor (2002) apresenta as diferenças entre a simulação e a emulação. Segundo o autor a emulação (diferente da simulação “pura”), é quando se utiliza parte do sistema real que já esta em funcionamento integrado ao modelo. Considerando que o modelo é uma aproximação do sistema real, utilizar parte do sistema real, gera uma maior credibilidade, o que o autor denomina como: uma redução no “credibility gap” (lacuna de credibilidade).

Segundo o autor modelos de simulação apesar de serem construídos utilizando quase sempre os mesmos blocos de função se diferenciam da emulação, tanto no uso quanto na operação. O objetivo da simulação é chegar a melhor solução dentre

várias outras soluções que serão testadas fornecendo ao tomador de decisão a possibilidade de utilizar sua experiência, mas encontrar também novas soluções. Os resultados ajudam a definir o leiaute físico de um sistema e seus limites operacionais. Já a emulação é utilizada de forma mais específica, com o objetivo de testar o sistema de controle sobre diferentes condições de carga do sistema ou treinar operadores sem apresentar riscos ao operadores e de danos aos equipamentos. Outra diferença é quanto a velocidade da execução. Na simulação, devido ao caráter exploratório, é desejável acelerar a execução permitindo testar várias possibilidades em um curto intervalo de tempo. Já a emulação, utiliza tempo real, pois, a maior parte dos sistemas de controle é concebida para operar desta forma. O autor também destaca que modelos de simulação possuem uma contagem de tempo própria. O relógio da simulação não avança até que os cálculos necessários tenham sido realizados e que uma determinada decisão tenha sido avaliada. Isso significa que o tempo de simulação para enquanto as decisões são tomadas. No sistema real (emulação) essa decisão foi gerada após várias etapas, e cada uma delas leva uma quantidade mensurável de tempo.

Outra diferença destacada é a importância da repetibilidade para a simulação e da robustez para a emulação. A simulação, desconsiderando raras exceções, tem um comportamento determinístico, variando apenas quanto à aleatoriedade, que pode ser representada no modelo através de distribuições estatísticas. Já a emulação, tem um comportamento não determinístico. Como a maioria das vezes o modelo emulado roda em um dispositivo enquanto o sistema de controle é executado em outro, a repetibilidade é incerta, devido o fato da comunicação de forma assíncrona. Apesar de ser algo incomum para os modelos de simulação os sistemas de controle devem estar preparados para isso. As redes de comunicações não são determinísticas e os sistemas de controle precisam estar preparados para lidar com essas situações, por isso, torna-se essencial para o modelo de emulação ser robusto.

### **2.1.3 Softwares de simulação**

Atualmente existem mais de sessenta softwares utilizados para a construção de modelos de simulação a eventos discretos (SWAIN, 2007). Dentre estes, serão apresentados na sessão os 3 softwares mais aderentes ao presente trabalho.

### 2.1.3.1 ARENA

O Arena é um software de simulação fornecido pela *Rockwell Automation*, um tradicional fabricante do segmento de automação. Surgiu da integração do ambiente de simulação Siman e do pacote gráfico Cinema que possibilitava a realização de animações. Foi um dos primeiros softwares a oferecer a funcionalidade de programação em auto nível e animação gráfica. Possibilita a modelagem de sistemas de diversos segmentos, desde sistemas logísticos a sistemas automatizados. É um dos softwares pioneiros da funcionalidade de teste de sistemas de controle devido a sua ampla integrabilidade aos outros softwares da Rockwell e os controladores deste fabricante (KELTON, 2010). A Figura 3 apresenta a interface gráfica do Arena.

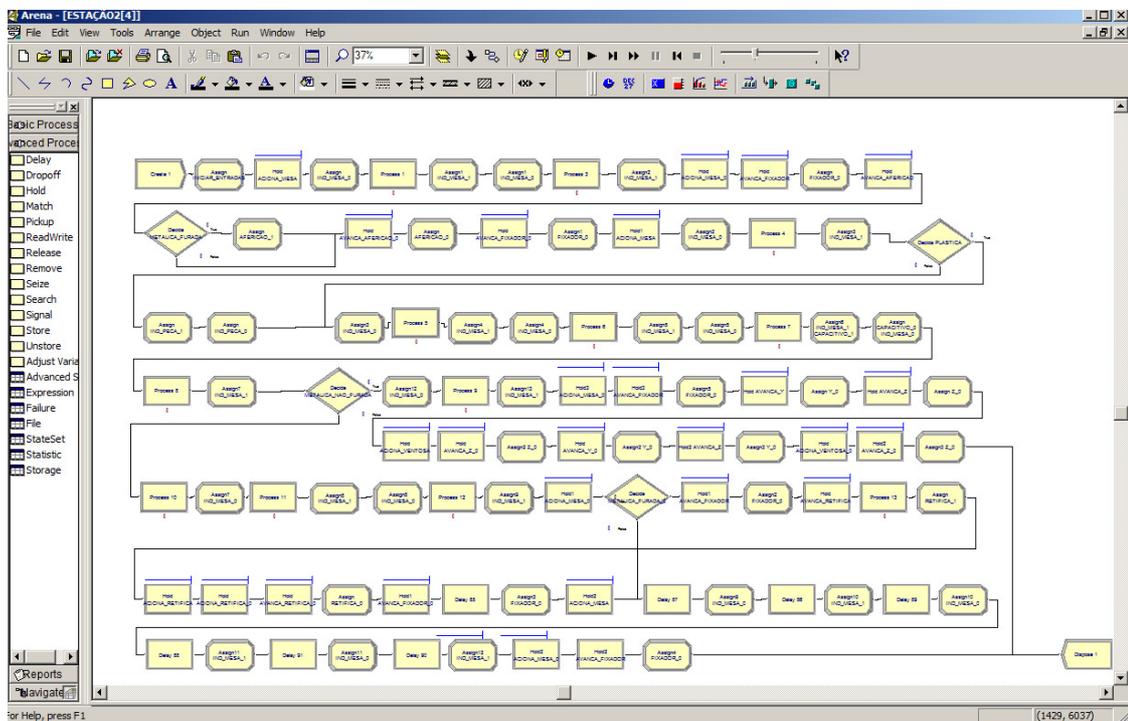


Figura 3: Interface gráfica Arena

### 2.1.3.2 AUTOMOD

Automod é um ambiente de simulação que permite a modelagem de sistemas tanto discretos como contínuos. Foi concebido como uma ferramenta exclusivamente de simulação a eventos discretos na década de 80. Desde então, apresentava como diferencial a possibilidade de criação de animações em três dimensões. O foco principal do AutoMod está na produção e análise e sistemas de manuseio de materiais. Porém, devido a sua grande flexibilidade pode ser facilmente utilizado para análises diversas, como sistemas logísticos e outros. Atualmente, a Brooks Software, fornecedora de AutoMod e a SIMUL8 Corporation, formaram uma aliança na indústria de software de simulação. Enquanto o pacote correspondente ao SIMUL8 oferece melhor funcionalidade para aplicações de modelagem conceitual, o Automod se destaca em aplicações realísticas e detalhadas. Principalmente pelo ambiente gráfico e pela possibilidade de integração a sistemas reais, através de um servidor OPC. O Automod tem como diferencial as aplicações de testes de sistemas de controle principalmente devido a possibilidade de integração da análise de sistemas automatizados complexos. Permitindo a aplicação desde o desenvolvimento preliminar do sistemas de controle ao comissionamento deste. A Figura 4 apresenta a interface gráfica do Automod sendo utilizada de forma integrada tanto como animação gráfica quanto como ferramenta de análise de sistemas de controle (MULLER, 2011).

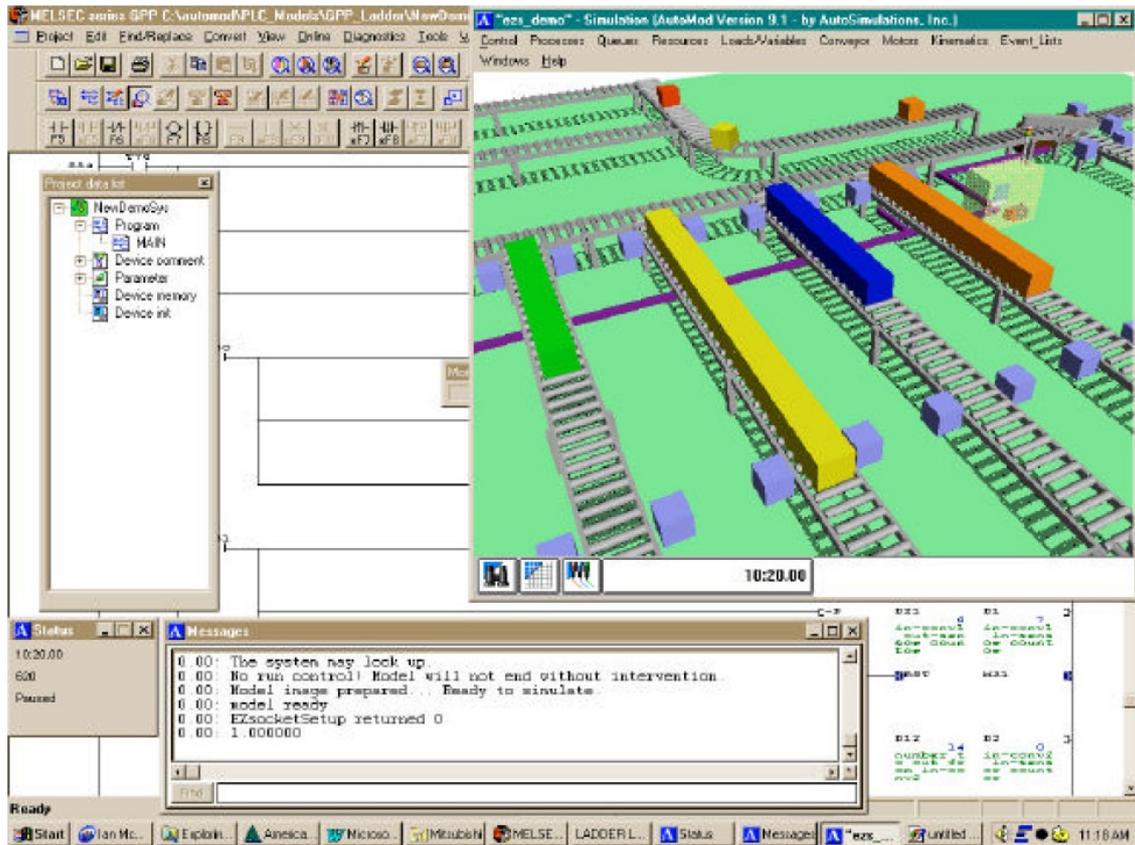


Figura 4: Interface gráfica Automod

### 2.1.3.3 URURAU

O Ururau é o primeiro software construído no Brasil com o propósito de ser utilizado como ambiente de desenvolvimento de modelos de simulação a eventos discretos. (PEIXOTO, *et al*, 2013). É construído em código aberto e distribuído sob licença de software livre, o que permite o uso acadêmico, a exploração de algoritmos internos e a criação de novas funcionalidades. Este ambiente utiliza recursos gráficos para a criação de modelos de simulação inspirados na simbologia da linguagem de modelagem IDEF-SIM, proposta por Montevechi *et al* (2010). A Figura 5 apresenta a interface gráfica do Ururau e seus recursos básicos: Menu principal; barra de ferramentas; elementos de modelagem; e navegador (PEIXOTO, *et al*, 2013).

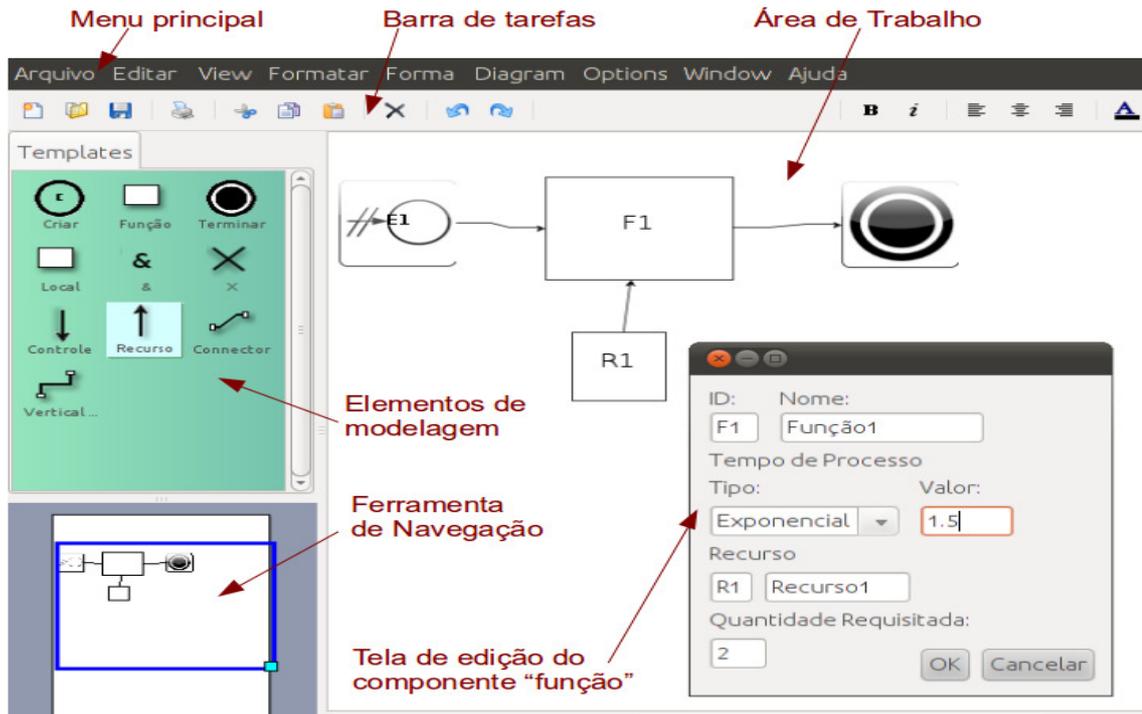


Figura 5: Interface gráfica do Ururau

#### 2.1.4 Ciclo de vida de projetos

Segundo Menezes (2007), um projeto é uma atividade temporal, ou seja, tem início e fim previstos. Sendo assim, este possui um ciclo de vida típico, que pode ser dividido em 4 etapas, apresentadas na Figura 6.

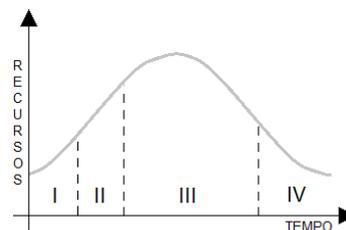


Figura 6- Ciclo de vida típico de um projeto  
Fonte: Menezes (2007)

A fase I, denominada Conceitual, é a fase inicial, que marca a germinação da ideia, esta etapa envolve identificar as necessidades e as oportunidades do projeto, visando sua aprovação.

A fase II, denominada Planejamento, tem como objetivo a estruturação e a viabilização econômica do projeto. Nesta etapa a proposta de trabalho, já aprovada,

é detalhada quanto a prazos e custos facilitando o gerenciamento e a execução deste.

A fase III é caracterizada pela Execução do projeto propriamente dito, os recursos alocados começam a ser utilizados para construção do item projetado, seja ele produto ou serviço. Nesta etapa, é comum a realização de ajustes no projeto, porém, o objetivo central inicial deve ser seguido, e os planos intermediários corrigidos periodicamente.

A fase IV, Conclusão, visa o término das atividades de execução, a finalização do projeto. Nesta etapa é comum realocar recursos de uma atividade finalizada para outra ainda em execução visando acelerar a transferência do item do projeto ao proprietário/usuário.

Apesar de serem caracterizadas pelo baixo investimento, as etapas de concepção e planejamento não podem e não devem ser negligenciadas. Estas são essenciais para que se possam prever dificuldades que serão enfrentadas durante a etapa de execução. O desconhecimento destas gera problemas como atrasos na finalização do projeto e custos elevados com retrabalho e modificações do projeto durante a execução.

Uma das técnicas empregadas para auxiliar a tomada de decisão durante as fases de concepção e planejamento é a utilização de modelos de simulação, para avaliar o desempenho e tentar prever problemas antes da execução do projeto. Em projetos complexos, onde a tomada de decisão é dificultada devido aos elevados riscos e altos custos que representariam em caso de escolhas erradas, o emprego desta técnica se torna essencial e, apesar de aumentar os custos nas fases preliminares, gera redução do tempo e custo na fase de execução. O projeto de implantação ou modificação de uma planta industrial, assim como outros projetos, envolve a execução de tarefas ordenadas de forma sequencial ou paralela. Sua complexidade aumenta de acordo com o porte do projeto e a quantidade de tarefas que são executadas de forma simultânea. Porém, a execução de tarefas de forma síncrona é um dos meios de reduzir o tempo de execução do projeto, chamado engenharia simultânea (PRADO, 2004).

Por outro lado, as plantas de processo se tornam cada vez maiores, complexas, necessitam de constantes modificações e envolvem cada vez mais pessoas na tomada de decisão. É cada vez mais difícil manter um produto por muito tempo no mercado sem que seu preço sofra reduções ou quedas bruscas nas

vendas. Portanto, as indústrias precisam reduzir o *lead-time* dos seus produtos, ou seja, projetar, modificar suas instalações, fabricar novos produtos e entregá-los aos consumidores em um intervalo de tempo cada vez menor (HIBINO, 2002).

### **2.1.5 Comissionamento de sistemas industriais**

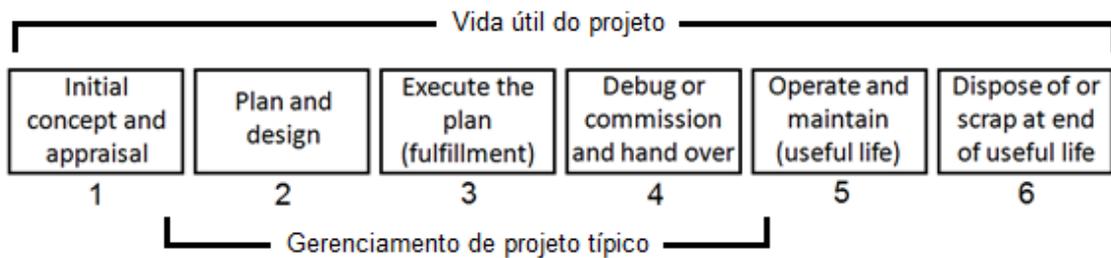
O comissionamento de instalações industriais é essencial na execução de projetos instalação ou modificações de plantas. Tem como objetivo realizar verificações e testes a fim de assegurar o perfeito funcionamento das instalações, sem por em risco os equipamentos ou os colaboradores que irão interagir de forma direta ou indireta com estes (CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA, 2007).

Apesar de esta etapa ser essencial para aferir o correto funcionamento de plantas industriais novas ou alteradas, não há um procedimento padrão geral que possa ser aplicado aos diversos tipos de equipamentos existentes na indústria. Cada equipamento deve ser analisado individualmente quanto aos possíveis riscos que podem gerar danos tanto a planta industrial, quanto aos operadores envolvidos. Porém, a análise do funcionamento de um equipamento complexo e os possíveis riscos de operação não apenas do equipamento propriamente dito, mas da interação deste com os demais é uma tarefa exaustiva.

Na maioria das vezes é comum utilizar os procedimentos gerais realizado em outro equipamento similar para auxiliar a execução da etapa de comissionamento. Porém, vários fatores de contorno podem influenciar na operação do referido equipamento, e principalmente a interação deste com os demais. Desta forma a utilização de um ambiente de testes virtual, se apresenta como uma solução potencial para realização de testes visuais e intuitivos do sistema. Permitindo uma avaliação mais detalhada e menos ariscada. Principalmente da operação automática do sistema e detecção de falhas neste.

O comissionamento é uma etapa importante de um projeto de modificação ou implantação de uma planta industrial. Lock (2007), como representado na Figura 7, detalha as etapas do projeto tanto para um possível desenvolvedor externo (o ciclo de vida da elaboração do projeto propriamente dito) quanto para a própria empresa (todo o ciclo de vida do projeto executado). Enquanto o executor recebe a proposta

do projeto já aprovado, realiza o planejamento junto com a contratante, executa e conclui o projeto. O contratante precisa definir todo escopo, propor a execução, acompanhar todo planejamento, execução, manter a planta construída e se desfazer do item fruto do projeto no fim de sua vida útil.



**Figura 7- Project life cycle**  
**Fonte: Lock (2007)**

## 2.2 ESTADO DA ARTE

### 2.2.1 Metodologia de busca

A pesquisa foi iniciada utilizando as bases Scopus, ISI e Scielo. A primeira verificação, utilizando a base Scopus, retornou 32 trabalhos. Enquanto a pesquisa utilizando a base ISI retornou 20 resultados. Dos 52 trabalhos encontrados utilizando as referidas bases, 2 eram iguais, totalizando 50 artigos distintos. Por fim, a pesquisa utilizando a base Scielo não retornou resultados. Desta forma 50 trabalhos publicados com o tema aplicação da simulação a eventos discretos e sistemas de controle e supervisão foram analisados no presente trabalho.

Após identificação dos artigos pesquisados, estes foram analisados individualmente. Dentre os 50 encontrados, 29 apresentam-se como fora do contexto da pesquisa ou menos aderentes ao foco do trabalho. Estes foram localizados na busca devido à cognância das palavras utilizadas. Embora a revisão que se apresenta não ter por objetivo ser exaustiva, esta pode ser considerada uma fonte útil de informações a cerca do tema simulação aplicada à automação. O Quadro 1 apresenta os 21 trabalhos aderentes ao tema, classificados quanto ao ano, autor e periódico/congresso de publicação.

**Quadro 1: Tabela ano de publicação, autor e periódico/congresso de publicação.**

	<b>ANO</b>	<b>Autor</b>	<b>PERIÓDICO/CONGRESSO</b>
<b>1</b>	1987	Erickson	Winter Simulation Conferente
<b>2</b>	1989	Hitchens	Winter Simulation Conferente
<b>3</b>	1989	Miles & Siddeley	Winter Simulation Conferente
<b>4</b>	1998	LeBaron & Thompson	Winter Simulation Conferente
<b>5</b>	1999	Auinger <i>et al.</i>	Winter Simulation Conferente
<b>6</b>	2001	Mueller	Winter Simulation Conferente
<b>7</b>	2001	Schiess	Winter Simulation Conferente
<b>8</b>	2002	Mc-Gregor	Winter Simulation Conferente
<b>9</b>	2002	Rengelink & Saanen	Winter Simulation Conferente
<b>10</b>	2002	Rohrer & McGregor	Winter Simulation Conferente
<b>11</b>	2002	Versteegt. & Verbraeck	Winter Simulation Conferente
<b>12</b>	2003	Mc-Gregor	IASTED International Modeling and Simulation
<b>13</b>	2007	Johnstone <i>et al</i>	Winter Simulation Conferente
<b>14</b>	2008	Ko	European Conference on Modelling and Simulation
<b>15</b>	2010	Ko <i>et al</i>	Winter Simulation

			Conferente
16	2010	Koflanovich & Hartman	Winter Simulation Conferente
17	2010	Phillips, R. & Montalvo	Winter Simulation Conferente
18	2010	Pîrvu <i>et al</i>	Academic Journal of Manufacturing Engineering
19	2010	Han <i>et al</i>	International Journal of Mathematics and Computers in Simulation
20	2012	Meyer <i>et al</i>	Winter Simulation Conferente
21	2012	Seidel <i>et al</i>	Winter Simulation Conferente

Por outro lado, a partir de uma análise das referências apresentadas nos artigos encontrados, detectou-se diversos outros trabalhos relevantes que não foram encontrados nas bases de pesquisa utilizadas. Estes foram pesquisados em bases da própria editora de publicação ou site do congresso onde o artigo foi publicado. Desta forma, outros 19 trabalhos foram encontrados, dentre eles 12 de congresso e 7 de periódicos. Desta forma, foram encontrados 40 artigos, 21 nas bases de pesquisa e 19 através da análise das referências destes, dos quais 9 são de periódicos e 31 de congressos.

Estes 40 artigos foram utilizados como base para o presente estudo. Trata-se de um tema muito recente, pois apesar de existirem trabalhos da década de 80 estes apenas citavam a possibilidade de utilização futura da simulação para teste de sistemas de controle. Desta forma, trabalhos mais concretos, que utilizam a metodologia, foram publicados no fim da década de 90.

### 2.2.2 Artigos classificados no período de 1980 a 2000

O primeiro artigo encontrado que aborda a aplicação da simulação a eventos discretos integrada a sistemas de controle foi Erickson (1987). O autor afirma que

esta abordagem possibilita quatro tipos de aplicações: Teste de sistemas de controle, emulação (utilização dos dados em tempo real para gerar uma animação), para análise de sequenciamento e alocação de equipamentos e para controle de contingência (analisar os efeitos de mudanças na estratégia de controle, avaria de uma máquina e outros problemas). A maior limitação encontrada pelo autor para o desenvolvimento do trabalho foi a questão tecnológica da época. Trata-se do primeiro trabalho que aponta a aplicação da simulação para teste de sistemas de controle, porém não traz detalhes do funcionamento devido a limitações tecnológicas.

Hiitchens e Ryan (1989) apresentam a relação da simulação a eventos discretos com o ciclo de vida do projeto a ser executado. Os autores afirmam que modelos de simulação são sistemas evolutivos. Ou seja, um modelo preliminar é desenvolvido e utilizado durante a etapa de concepção do projeto. Então, este modelo passa por modificações e pode ser utilizado na etapa de planejamento. Após algumas modificações este modelo pode ser utilizado para realizar a emulação durante a etapa de execução. Terminada a fase de execução, pode-se incorporar este modelo ao sistema de controle permitindo testar este sistema durante as etapas de teste e comissionamento. Por fim, o modelo desenvolvido pode até mesmo auxiliar a execução de manutenções e modificações futuras dos equipamentos. Os autores destacam que aplicação da simulação poderia reduzir 50-70% do custo a etapa de teste e comissionamento e permitir que esta seja realizada de forma mais rápida e eficiente.

Miles e Siddeley (1989) afirmam que os testes de sistemas de controle convencionais são realizados de forma demorada e podem gerar danos aos equipamentos. Os testes são realizados de forma modular, ou seja, não analisa os pontos onde há a interação entre os equipamentos. Então, os autores afirmam que através de uma interface de comunicação entre o sistema de controle e o modelo de simulação a eventos discretos seria possível testar sistemas de controle. Os autores afirmam que duas formas de comunicação podem ser utilizadas. A primeira delas, a conexão direta com as entradas do dispositivo, mais eficiente para sistemas complexos. Ou, através da conexão por interface de comunicação, mais simples e barata. Para desenvolver a lógica do modelo os autores utilizaram a linguagem Siman.

LeBaron e Thompson (1998), destacam a possibilidade da utilização da simulação a eventos discretos para emulação e teste de sistemas de controle. Afirmam que a utilização da emulação possibilita incorporar aos sistemas animação e distribuição estatística, e pode reduzir os custos durante a etapa de testes.

Dougall (1998) afirma que erros no sistema de controle podem gerar riscos elevados para as empresas. Além disto, afirma que o método tradicional de testes é dividido em 3 etapas, desenvolver a lógica de controle, instalar o sistema e testar/reescrever a lógica de controle, porém, esta abordagem é dispendiosa. Desta forma o autor apresenta a possibilidade de utilizar os simuladores tradicionalmente utilizados apenas na etapa de planejamento para testar sistemas de controle. O autor destaca 3 vantagens do uso da simulação a eventos discretos para teste de sistemas de controle:

1. Identificar e eliminar riscos do projeto: o custo de se investir num método avançado de teste pode ser recuperado com a eliminação de riscos e desperdícios durante o primeiro ciclo de funcionamento, *start-up*. Problemas como o elevado tempo despedido durante a etapa de testes; o desperdício de produto gerado devido ao ajuste não adequado dos equipamentos durante esses testes; se não descartado o produto produzido fora das especificações pode ser vendido e gerar descontentamento por parte do cliente; risco de danos aos equipamentos; apresentar risco aos operadores.

2. Economizar tempo e dinheiro: o uso da simulação pode gerar reduções significativas no tempo de execução de *start-ups*. Vantagens como redução do tempo de inatividade da planta; redução de até 30% dos custos durante a etapa de *start-up*; possibilidade da realização de testes em laboratório, reduzindo o tempo que o operador é mantido no campo executando os testes, reduzindo a exposição a riscos e pagamentos de horas extras;

3. Treinamento de operadores: a melhor forma de treinar um operado é através da interação deste com o sistema, porém utilizar a planta real pode apresentar diversos riscos. Desta forma, a planta simulada permite a realização de treinamento com baixo risco e em tempo real. Possibilita gerar cenários que seriam caros de serem gerados na planta real, como situações extremas da planta de processo. Possibilidade de reciclagem dos operadores em atividade.

Além disto, o autor apresenta a possibilidade de utilização da simulação para diversas finalidades e em diferentes etapas do projeto:

1. Auxiliar a tomada de decisão durante a etapa de planejamento: Os simuladores foram concebidos para essa finalidade e apresentam desempenho potencial para esta função.

2. Desenvolver e testar a lógica de controle de forma rápida: a integração com o modelo possibilita o desenvolvimento de lógicas com menor índice de erros, pois esta pode ser testada durante a etapa de desenvolvimento, e de forma mais rápida.

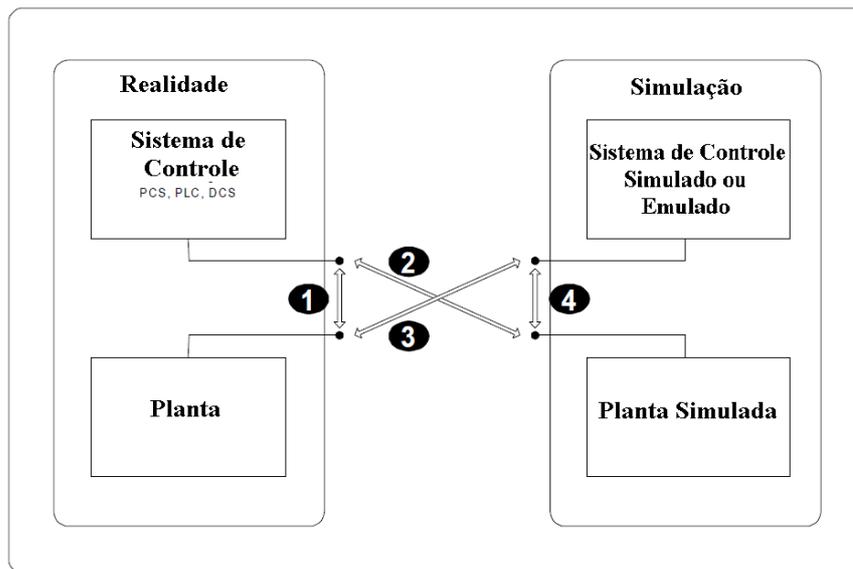
3. Testar todo o sistema de forma integrada: possibilita testar todo sistema antes do *start-up*. Nesta fase, todas as telas de supervisão podem ser testadas tanto no aspecto gráfico quanto a correto funcionamento dos alarmes e outras funcionalidades. Permite testar o sistema de gerenciamento, coleta de dados, emissão de relatórios. Além disto, permite testar todo o sistema de comunicação quanto o correto envio de informações e o desempenho da rede.

4. Revisão e aprovação da lógica: é possível testar o sistema exaustivamente antes da instalação, principalmente quanto a parâmetros que apresentariam risco ou seriam caros de serem realizados utilizando o sistema real. Isso pode aumentar drasticamente a sensação de segurança em ir para o campo com um software que já foi demonstrado e aceito.

5. Treinamento de operadores: possibilitar o treinamento de operadores e obter um feedback quanto as telas de supervisão desenvolvidas. Muitas vezes nesta etapa são feitas alterações no sistema de supervisão visando facilitar o monitoramento e operação do sistema.

6. Comissionamento do sistema de controle: a realização do comissionamento de um sistema já testado e aprovado é menos dispendiosa e menos arriscada. Além disto, estes benefícios se estendem os próximos projetos, pois em futuras manutenção e modificações o tempo de inatividade pode ser minimizado. O sistema pode ser mantido em funcionamento até que todas as modificações de software sejam feitas e testados off-line.

Auinger *et al* (1999), apresentam um esquema (Figura 8) que detalha quatro diferentes aplicações da simulação a eventos discretos relacionados a sistemas de controle. A primeira delas representada pela seta 1 representa a forma tradicional de testar sistemas de controle, na qual, após a construção da planta física, elaboração e instalação de todo sistema de controle, se realiza o comissionamento e correção dos erros.



**Figura 8: Possibilidade da utilização da simulação para sistemas de controle**  
**Fonte: Auinger et al (1997)**

A seta 2 representa o comissionamento virtual, quando um modelo de simulação que representa a dinâmica da planta, é integrado ao sistema de controle real possibilitando a realização de testes antes do sistema real estar completamente construído e permite utilizar o modelo utilizado anteriormente na etapa de planejamento. A seta 3 representa uma integração entre a planta real e a planta simulada, chamado “Reality in the Loop”, isso possibilita que o modelo adquira maior realismo e possa auxiliar de forma mais precisa na tomada de decisão. A seta 4 representa a integração entre o sistema de controle emulado e o modelo de simulação, o que possibilita utilizar a emulação para auxiliar a etapa de desenvolvimento do sistema de controle e permitir testes preliminares.

### 2.2.3 Artigos classificados na década de 2000

Schludermann *et al* (2000) utilizam um protocolo de comunicação TCP/IP para integrar um modelo de simulação a eventos discretos ao sistema de controle para realização do *Soft-Commissioning*. Os autores afirmam que em sistemas complexos os testes do comportamento de um PLC que controla um determinado equipamento é feito de forma independente ao sistema no qual ele está inserido. Este método ignora a interação do equipamento com outras partes do sistema.

Considerando que as condições de interação entre estes equipamentos são difíceis de reproduzir, estes testes muitas das vezes são feitos de forma local, gerando elevados custos e pondo em risco tanto o sistema quanto os operadores. Desta forma, a utilização da simulação integrada ao sistema de controle permitiria além de uma melhor reprodução das condições testadas, uma redução tanto no custo da execução dos testes, quanto no risco aos operadores.

Mueller (2001) apresenta um estudo de caso da modificação de uma linha de controle, recém montada, onde durante a montagem se utilizou o comissionamento virtual. O sistema construído apresentou algumas falhas após um mês da implementação. Com o uso do simulador desenvolvido para o teste do sistema de controle, foi possível localizar o erro, isola-lo e corrigi-lo sem interferir na produção. Este trabalho mostra que o modelo desenvolvido pode ser utilizado mesmo após o termino do projeto, para modificações ou reparos futuros, mostrando a utilidade do modelo desenvolvido e aprimorado a cada etapa do projeto durante todo o ciclo de vida deste.

Schiess (2001) apresenta a emulação como uma ferramenta potencial para testar sistemas de controle. Ele afirma que os testes realizados em laboratório, utilizando a emulação, economizam tempo, dinheiro e geram menos problemas. O custo mínimo de uma emulação pode ser recuperado muitas vezes, reduzindo o tempo que a planta é mantida fora de funcionamento. Além da redução dos custos e riscos que envolvem manter os funcionários no campo testando o sistema (incluindo viagens, horas extras, adicionais, risco de acidentes, exaustão dos funcionários e outros). E da redução dos danos gerados aos equipamentos.

Rengeling e Saanen (2002) afirmam que alterações e expansões em plantas industriais devem interromper a operação tão pouco quanto possível. Logo, os sistemas devem ser testados exaustivamente antes de serem implementados. Os autores usam o exemplo de um sistema de manuseio de bagagem de um aeroporto, sistema de suma importância, que em caso de parada pode gerar grande transtorno. Segundo o autor, o programa de controle é o principal fator gerador de erros do sistema e a utilização de modelos de simulação a eventos discretos possibilitou a realização de testes sem a necessidade de parada do equipamento real. O uso da abordagem além de possibilitar a realização de testes detalhados e fornecer ao cliente uma visão detalhada do comportamento do CLP, gerou reduções significativas no tempo de execução do projeto.

Rohrer e McGregor (2002) destacam a aplicabilidade da simulação a eventos discretos para construção de um uma “fabrica virtual” onde ideias podem ser testadas de modo a melhorar o desempenho do sistema. No artigo os autores detalham a aplicabilidade do software de simulação a eventos discretos denominado AutoMod na realização de testes de sistemas de controle.

Versteegt e Verbraeck (2002) afirmam que sistemas de controle de empresas logísticas estão entre os mais complexos. E que esses sistemas são testados apenas após serem completamente construídos durante a etapa de comissionamento. Isto leva a existências de diversas falhas dispendiosas no momento do arranque do sistema. O artigo descreve o papel que a simulação pode desempenhar no comissionamento de sistemas logísticos automatizados. Além disso, os autores utilizam 3 softwares distintos (Simple++, AutoMod e Arena) para desenvolver os modelos e testar o sistema de controle de uma sistema logístico.

Mc-Gregor (2003) afirma que sistemas AMHS (sistemas automatizado de movimentação de materiais) são complexos e são extremamente suscetíveis a erros. E apresenta como modelos de simulação podem ser utilizados para fornecer um *feedback* realista e possibilitar a execução de testes e correção de erros em sistemas de controle durante a fase de comissionamento de projetos. Isso se acentua em projetos onde o número de parâmetros de entrada faz com que seja impossível imaginar o resultado e realizar testes de forma experimental. O autor afirma que a utilização da abordagem gera uma redução do tempo e dos custos de execução de projetos e facilita a execução de modificações futuras. E, afirma que os modelos podem ser utilizados durante a fase de planejamento para definição de layout e dimensionamento, reduzindo significativamente os riscos e custos da tomada de decisão.

Rohrer (2003) afirma que apesar da comprovada eficiência da simulação a eventos discretos para refinar e reduzir desperdícios a abordagem requer um investimento tanto em recursos humanos, quanto em software. Então surge a seguinte dúvida “vale a pena fazer”. O autor destaca que o retorno do investimento, denominado ROI (*Return On Investment*), é dado pela relação entre o quanto foi investido e o quanto se obteve de retorno. Logo, apesar de gerar um aumento dos custos do projeto, o uso da simulação reduz os custos associados a incertezas e retrabalhos.

Johnstone *et al* (2007) destacam a aplicabilidade do protocolo de comunicação OPC (OLE for Process Control), para interligação entre PC's e controladores. Esta é uma ferramenta fundamental para realização de testes utilizando emulação. Porém, quando os modelos requerem transferências de dados mais rápidas e de volume e superior, o protocolo não apresenta comportamento adequado. Desta forma, os autores apresentam uma interface que permite a comunicação em alta velocidade entre controlador e PC, permitindo a emulação de sistemas de controle maiores e mais complexos. Um sistema de manuseio de bagagem de um aeroporto foi utilizado para realização de testes, e os resultados foram satisfatórios.

Harrison e Tilbury (2008) afirmam que, ao construir uma nova planta ou realizar alguma alteração em uma planta existente, é comum utilizar modelos para realização de testes. Porém, os modelos nem sempre apresentam o comportamento adequado, diferindo muito do sistema real. O modelo mais fiel de um sistema é o próprio sistema. Desta forma, os autores propõem a integração de modelos de sistemas modulares de manufatura (robôs, máquinas, transportadores, controladores) aos seus homólogos reais, formando um sistema híbrido. O sistema híbrido permite que parte do sistema real seja utilizada durante a realização dos testes, possibilitando um maior realismo. Além disto, não é necessário modelar todo sistema, apenas a parte de maior interesse, reduzindo o tempo de modelagem.

O ambiente híbrido possibilitaria analisar o impacto de um novo equipamento na linha de produção antes dele ser requisitado, facilitando a escolha do equipamento que melhor se adequaria ao sistema. Isso se acentua em situações em que o equipamento em questão possui elevado valor de aquisição e manutenção, reduzindo significativamente os riscos da tomada de decisão. Sendo assim, o ambiente híbrido possibilitaria uma integração entre os tomadores de decisão e os fornecedores, gerando melhores resultados.

Os autores apresentam definições uteis sobre os termos utilizados na literatura a respeito da integração de sistemas de controle e simuladores:

EIL (*Emulation-the-Loop*, emulação): é um ambiente onde a maior parte do sistema é composta por hardware, e apenas uma pequena parte modelos;

HIL (*Hardware-in-the-Loop*, hardware na malha): é um ambiente composto predominantemente por hardware, integrado ao um modelo;

HPS (*Hybrid Process Simulation*, sistema híbrido): é um processo que tem várias regiões de hardware e simulação trabalhando juntos.

Ko *et al* 2008 propõem um ambiente de programação de CLP's que permite a verificação de programas de controle de forma intuitiva com o auxílio de um ambiente gráfico 3D. O ambiente é composto pelo CLP integrado a um modelo correspondente de uma determinada planta através de um servidor de I/O's.

Os autores afirmam que vários softwares foram desenvolvidos para teste de sistemas de controle utilizando autômatos finitos. Porém, estes possuem limitações, relacionadas principalmente a dificuldade do usuário de determinar se o programa de controle desenvolvido atende as especificações.

Smith e Cho (2008) abordam um método de endereçamento para um modelo de simulação de uma planta e de um programa de controle emulado, possibilitando a realização de um comissionamento off-line. Os autores utilizaram como sistema teste uma linha de produção de embalagens de alta velocidade, e implementam o ambiente de teste utilizando softwares da Rockwell. Porém, afirmam que o mesmo poderia ser feito utilizando outros fabricantes.

Park *et al* (2008) propõem um ambiente integrado de programação de CLP's que permite a verificação visual e de forma intuitiva da lógica de controle desenvolvida através de um ambiente gráfico 3D. O sistema é composto pelo sistema de controle e um modelo de simulação corresponde a uma determinada planta. O modelo inclui todos os dispositivos do sistema de produção, e o PLC contém a lógica de controle para o modelo de planta.

Segundo os autores os ambientes de programação PLC convencionais não são especialmente intuitivos, particularmente para o teste e depuração de um programa de PLC, pois mostram apenas o status de um PLC sem fornecer links para o sistema. Para a validação de um programa PLC, os engenheiros precisam imaginar as mudanças de estado de uma linha de produção de portas de entrada e saída de um PLC.

Por essa razão ambientes de programação PLC convencionais são, muitas vezes, ineficientes e propensos a erro humano. A necessidade de um ambiente de programação PLC mais intuitivo aumenta à medida que as configurações de linhas de produção e seus programas de controle tornam-se mais complexos.

#### 2.2.4 Artigos classificados na década de 2010

Bastos *et al* (2010) apresentam e avaliam um mecanismo para integração de um modelo de simulação a eventos discretos com um sistema de controle. Tradicionalmente, os testes dos sistemas de controle são feitos diretamente ligados a planta de processo. Nesta abordagem um controlador lógico programável (CLP), ora real ou virtual, está ligado a um modelo de simulação em vez da planta industrial, resultando em um ambiente de teste mais seguro e menos dispendioso. Além disto, puderam-se incorporar eventos aleatórios, comum em sistemas estocásticos, aos testes do sistema de controle de uma planta industrial.

Han *et al* (2010) propõem um ambiente integrado para teste de sistemas de controle e desenvolvimento de telas de supervisão. Um modelo de simulação a eventos discretos orientada a objeto (modelo lógico) e um sistema de supervisão (modelo gráfico) são desenvolvidos e integrados gerando um ambiente de teste de ambos os sistemas. Segundo os autores existem muitas limitações na elaboração de sistemas de controle e telas de supervisão, porém, a integração deles possibilitaria testar ambos de forma mais visual. A grande vantagem desta integração, é que o sistema de controle pode ser testado de forma preliminar antes da construção do sistema real. Além disto, o modelo gráfico desenvolvido e testado é utilizado como sistema de supervisão, reduzindo o tempo de execução do projeto.

Hoffmann *et al* (2010) afirmam que o comissionamento virtual de sistemas de manufatura tem sido pesquisado há mais de 10 anos. Sua intenção é testar os sistemas de produção e programas de controle através da simulação realizada antes dos sistemas reais são construídos. Os benefícios esperados são a redução dos erros e do tempo correção despendidos durante o comissionamento real, no entanto, só pode ser alcançados se os modelos do de fabricação estão disponíveis para simulação. Até o momento, o projeto de tais modelos, certamente, exige um nível elevado de conhecimentos e um esforço considerável, o que não faz o comissionamento virtual atraente, especialmente para as pequenas e médias empresas (PME).

O artigo descreve alguns novos conceitos para o projeto sistemático e simplificado de modelos de sistemas de produção baseados em bibliotecas e receitas padronizadas para o desenvolvimento de modelos. Os autores estimulam a

disponibilização junto com o equipamento de um modelo deste, facilitando o desenvolvimento do ambiente simulado e tornando-o mais atrativo para PME's.

Ko *et al* (2010) realizam um estudo de caso para teste de sistema de controle em uma planta de fabricação de automóveis. Devido à grande complexidade do sistema e a consequente dificuldade de interpretação do programa de controle do CLP, os autores propõem a criação de um ambiente gráfico de testes. Este ambiente, composto por modelos 3D e controlador, utilizaria dados reais da linha de produção e possibilitaria a verificação e execução de testes do sistema de controle. Como os testes seriam executados sem antes de implementação real do sistema, a abordagem geraria significativa redução do tempo e custo de execução do projeto.

Koflanovich e Hartman (2010) afirmam que existem plantas que apesar de sua grande complexidade, devem ser mantidas em funcionamento mesmo durante a realização de modificações nestas. Isso acontece em sistema de manuseio automático de materiais (AMHS), onde a modificação do sistema depende de uma iniciação rápida e previsível, sem riscos aos sistemas. Para que isso seja possível é necessário que testes extensivos antes de colocar o sistema modificado em funcionamento. Porém, estes testes não podem ser realizados utilizando o sistema real. Desta forma, os engenheiros desenvolvem uma sistema virtual contendo todo o controle e sinais de feedback, velocidade de operação, limitações e características físicas do equipamento e etc.

A abordagem foi utilizada em um sistema composto por vinte e um controladores programáveis, uma estação centra de supervisão e quatro interfaces de operação e todos os outros sistemas produzidos para interagir na planta física foram conectados ao modelo desenvolvido. Executou-se todo o sistema utilizando o modelo, e todos os testes de software, algoritmo, sistema de controle, interface de operação e supervisão, além dos teste de aceitação de fabrica (TAF), foram realizados no ambiente virtual. Então, o sistema modificado foi colocado em funcionamento sem qualquer interrupção na operação da fábrica.

Phillips e Montalvo (2010) apresentam a emulação como uma forma eficiente de testar o código de controle desenvolvido para sistema de produção de embalagens. Afirmam que esta é uma etapa crucial e de risco elevado durante a etapa de *start-up* de uma planta. Segundo eles, a emulação permite a construção de uma linha de produção 3D com comportamento correspondente a planta real trocando informações em tempo real com um controlador, possibilitando a realização

de testes antecipados. Utilizando esse ambiente é possível realizar teste de forma segura, fácil e reduzir os custos de *start-up* em até 50%.

Park *et al* (2010) relatam um processo automatizado para a construção de uma planta virtual testes de PLC. Grande parte dos programas de controle contem apenas a lógica de controle, sem informações sobre o modelo da planta. Por isso, é necessário construir o modelo da planta correspondente para executar a simulação. Convencionalmente, uma planta modelo para simulação PLC é construída manualmente, o que exige muito esforço e conhecimento aprofundado de simulação.

Como solução para este problema os autores propõem um processo automatizado para gerar um modelo da planta a partir da tabela de símbolos de um programa do PLC. Para isso, propõe-se uma regra de nomenclatura para símbolos PLC onde os nomes de símbolo incluem informações suficientes sobre o modelo da planta. Ao analisar esses nomes, é possível extrair um modelo de fábrica automaticamente. A metodologia proposta foi implementada e testada de várias formas e possibilitou a detecção de erros escondidos de forma mais intuitiva.

Pirvu *et al* (2010) afirmam que atrasos e problemas de software surgem quando a linha de produção tem componentes de automação de vários produtores e uma mudança de produção ocorre. Principalmente relacionado à otimização da produção. Porém, existe uma lacuna entre o planejamento da produção ou otimização e a produção real.

Então os autores utilizaram um software de planejamento que engloba um servidor OPC e o vincularam a um modelo e a linha de produção real. Isso permitiu controlar o sistema real através do modelo virtual com o auxílio de um servidor OPC.

Han *et al* (2011) propõem um modelo integrado para realização da prototipagem virtual como uma forma de lidar com a constante necessidade de modificações das linhas de produção, testar sistemas de controle e sistema de supervisão de um planta automatizada. O sistema é composto por um modelo de simulação a eventos discretos, orientada a objeto, e telas de supervisão desenvolvidas de forma independente antes/durante a execução física do projeto. Após a execução física do sistema as telas de supervisão são usadas para monitoramento do processo.

Koo *et al* (2011) propõem a utilização de modelos de plantas virtuais para verificação de programas de controle. O ambiente de verificação proposto consiste em três tipos de objetos. O primeiro deles é um modelo virtual da planta (modelo do

objeto) que é controlado pelo programa de controle do CLP (modelo funcional) que é então monitorado de forma dinâmica e interativa pelo sistema supervisorio (modelo dinâmico). O ambiente foi implementado e utilizou um modelo de I/O baseado no formalismo de Autômatos e Sistemas de Eventos Discretos Especificações (DEVS). Este ambiente possibilitou a realização de testes integrados e a detecção de erros no sistema sem que esses ofereçam riscos a planta de processo.

Okolnishnikov (2011) descreve o uso de modelos de emulação para auxiliar o desenvolvimento de sistemas de controle de processos industriais, permitindo que este seja testado antes do comissionamento. O ambiente proposto tem como principais possibilidades a representação 3D do ambiente analisado e a integração deste com sistemas de controle reais. O artigo apresenta três casos de sucesso no desenvolvimento e utilização de modelos de emulação de sistemas de controle de processo em vários campos industriais criadas com a ajuda deste meio ambiente. O uso de modelos de emulação reduz o tempo e o custo dos sistemas de controle otimização de testes. Modelos de emulação também foram utilizados para o treinamento do pessoal de operação.

Chiou *et al* (2011) desenvolveram um ambiente composto por modelo de simulação a eventos discretos e um controlador programável. Este ambiente foi utilizado por estudantes da universidade de Drexel como ferramenta didática para a modelagem e verificação de processos. Os estudantes podem desenvolver seu ambiente virtual um programa de controle correspondente e testa-lo utilizando o ambiente. O curso é ministrado utilizando o software de simulação, PLCStudio. E o objetivo do projeto é promover uma combinação de aprendizagem passiva e ativa na classe.

Han *et al* (2011) propõem um modelo integrado para realização da prototipagem virtual como uma forma de lidar com a constante necessidade de modificações das linhas de produção, testar sistemas de controle e sistema de supervisão de um planta automatizada. O sistema é composto por um modelo de simulação a eventos discretos, orientada a objeto, e telas de supervisão desenvolvidas de forma independente antes/durante a execução física do projeto. Após a execução física do sistema as telas de supervisão são usadas para monitoramento do processo.

Okolnishnikov (2011) apresenta um ambiente de simulação a eventos discretos para desenvolvimento e execução de modelos de emulação. O ambiente

possibilitou a construção rápida de modelos, representação 3D e a comunicação com controladores reais. Três estudos de caso nos quais foram utilizados a emulação como forma de testar sistemas de controle são apresentados em diferentes campos de aplicação da indústria:

1. Túnel ferroviário North-Muya na Sibéria – Rússia: testes off-line foram realizados utilizando o modelo desenvolvido; realização de comissionamento utilizando parte do sistema real e substituído determinadas partes que oferecem maior risco pelo modelo; além do treinamento de operadores sem o uso da planta real, reduzindo o risco de danos aos equipamentos.

2. Uma indústria petrolífera: vários cenários foram implementados no modelo de simulação para gerar situações de emergência como sobre carga no transformador de potencia, quebra de oleoduto entre outros. Isso possibilitou a realização de testes tanto no sistema de controle quanto no sistema de supervisão; otimização da produtividade do poço de acordo com o uso de bombas de diferentes desempenhos, tanto das bombas de trabalho, quanto nas bombas de produção; otimização no tráfico dos petroleiros, tanto relacionado ao combustível quanto aos motoristas.

3. Mineradora subterrânea de carvão: o modelo desenvolvido possibilitou o teste de todo sistema de controle e facilitou a implementação de várias funcionalidades como o acionamento centralizado das esteiras transportadoras; sincronização das esteiras; seleção do modo de acionamento; regulagem automática da velocidade da esteira de acordo com o fluxo de carvão; redução do consumo de energia consumida pelas esteiras; criação de uma ferramenta de treinamento de operadores; além disto, foram implementadas diversas falhas potenciais como sobrecarga do transformador de potência, quebra de oleoduto e outras falhas que não poderiam ser geradas no sistema real sem danificar os equipamentos.

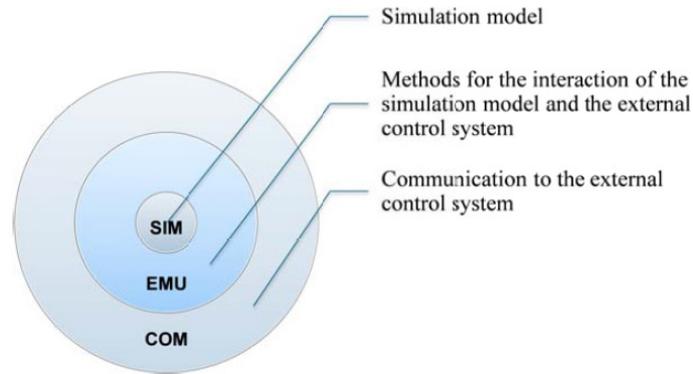
Cardoso *et al* (2012) apresentam um ambiente híbrido para desenvolvimento e testes de sistemas de controle. O ambiente utiliza um modelo de simulação a eventos discretos integrado a estações didáticas de manufatura. A lógica de controle do sistema automatizado pode atuar no processo em tempo real e de forma integrada tanto no modelo de simulação como no sistema real de manufatura. Isto possibilita que parte do sistema real seja utilizada durante a realização dos testes, e apenas a parte ainda não construída ou que apresenta risco durante a realização

dos testes seja utilizada de forma virtual. Durante a realização dos testes, ficou indiferente para o sistema de controle a atuação tanto no processo representado pelo modelo de simulação como a parte real.

Meyer *et al* (2012) apresenta um trabalho desenvolvido de forma integrada pela associação das montadoras de automóveis alemãs, chamada de Associação das Industrias Automotivas Alemãs (VDA - *Verband der Automobilindustrie*). Os autores apresentam uma biblioteca de simulação desenvolvida pela VDA, que auxilia o desenvolvimento de modelos utilizando o software “Plant Simulation” da Siemens PLM software de forma simples e utilizando uma linguagem padrão. O simulador, código aberto, é disponibilizado para todas as empresas da associação e fornecedores, possibilitando a intercambialidade de código e o fácil entendimento pelos profissionais do ramo. Porém, ainda não possuem uma animação gráfica que possibilite uma melhor interação com o sistema.

Os autores afirmam que na maioria dos casos os programadores não têm acesso ao sistema real, seja porque ele não existe, esta em construção ou não esta acessível para o desenvolvimento de software por outro motivo. Nestes casos o uso da simulação, seja ela desenvolvida nesta etapa, ou aproveitando um modelo desenvolvido anteriormente durante a etapa de planejamento do projeto pode auxiliar o desenvolvimento. Dentre as diversas vantagens, permite a execução de testes sem utilizar o sistema real e testar diferentes cenários que seriam dispendiosos de serem feitos utilizando o sistema real. Isso permite a construção de lógicas de maior qualidade, redução do tempo de desenvolvimento e redução dos custos.

Os autores afirmam que a criação de um ambiente de testes de sistemas automatizados é feita em três etapas, a primeira delas é desenvolver o simulador ou utilizar o simulador já utilizado durante a etapa de planejamento. A segunda etapa é selecionar os pontos relevantes do ponto de vista da realização de testes para adapta-los para que seja possível interagir diretamente com o sistema de controle. Por fim, integrar o modelo de emulação desenvolvido ao sistema de controle para realização dos testes como descreve a Figura 9.



**Figura 9: Relação entre a simulação, emulação e o sistema de comunicação**  
**Fonte: Meyer *et al* (2012)**

Seidel *et al* (2012) afirmam que os testes da planta e do CLP são efetuados inicialmente de forma separada. O teste integrado só realizado após a conclusão do sistema físico, numa fase muito tardia, gerando consequências como inconsistências do comportamento do sistema com o comportamento desejado. O resultado é uma etapa de comissionamento duradoura devido às paradas por erros de programação, aumentando os riscos financeiros e um desgaste com o cliente. Em projetos complexos como o armazenamento automático de material (MHS - *Material Handling Systems*) é necessário o uso de ferramentas computacionais que auxiliem o desenvolvimento. Porém, a simulação e comissionamento virtual convencionais não são mais suficientes, pois não possibilitam a verificação integrada de todas as etapas do projeto. Desta forma, os autores apresentam uma ferramenta de verificação integrada, que pode utilizar um modelo comum para todas as etapas do projeto.

A abordagem é composta por três etapas:

1. Projeto das instalações, leiaute da fábrica e análise de desempenho: desenvolvimento do modelo e utilização deste para seleção do melhor leiaute e detectar gargalos no sistema. Durante essa etapa a simulação pode ser acelerada permitindo que um longo período de operações, da ordem de dias ou até semanas, possa ser analisado em um espaço de tempo curto.

2. Implementação e teste do sistema de gerenciamento: selecionado o melhor layout, a segunda etapa visa testar o sistema de gerenciamento de material. Utilizando o modelo desenvolvido durante a etapa 1 testes são realizados visando obter um bom funcionamento do sistema de roteamento. De forma similar a etapa anterior, pode-se ajustar a velocidade da simulação.

3. Implementação e teste do sistema de controle: nesta etapa desenvolve-se a lógica de controle e integra-se a um modelo possibilitando a realização de testes. Essa lógica pode ser desenvolvida utilizando um software que emula o CLP. Além disso, o sistema de supervisão pode ser desenvolvido e testado durante essa etapa, possibilitando ao programador avaliar o sistema não só pela animação do simulador como também pelas telas que serão utilizadas pelo operador.

Como existem vários itens circulando pelo modelo, avaliar cada um deles de forma separada é uma tarefa dispendiosa. Para solucionar esse problema existe um sistema automático de teste de equivalência. Durante a simulação o fluxo de material cria-se um registro que armazenado em uma base de dados. Cada registro contém informações como origem, destino e o tempo. Isso possibilita comparar os registros de uma simulação de referência com o registro de simulação utilizando o CLP.

Segundo os autores o comissionamento virtual tem vários efeitos positivos: qualidade geral do software será melhorada, porque a avaliação e teste começam muito mais cedo do que era possível anteriormente; O contratante irá instalar programas testados, portanto, a quantidade e a duração dos testes de software no local são reduzidas de forma significativa; Outra vantagem é a capacidade de discutir e mostrar a função da lógica de controle e o sistema de supervisão ao cliente utilizando uma animação gráfica do sistema ainda em produção; Funcionários podem ser treinados na operação da planta por meio do modelo virtual; Condições da planta potencialmente perigosas podem ser simuladas; Além disso, futuras ampliações da planta podem ser modeladas utilizando o modelo desenvolvido.

Diogo *et al* (2012) apresentam um ambiente computacional para auxiliar o desenvolvimento de programas de controle de sistemas automatizados. A abordagem proposta é composta por 3 fases cíclicas, modelagem, síntese e implementação. Permitindo uma implementação progressiva e a detecção e reparo de problemas inesperados mesmo durante a execução do processo. Essa característica aumenta a confiabilidade do projeto e permite que modificações futuras sejam realizadas de forma mais fácil.

Ko *et al* (2013) apresentam uma abordagem para auxiliar o desenvolvimento de programas de controle de sistemas de manufatura flexíveis (FMS), baseado em modelos de simulação. As abordagens FMS convencionais descrevem a dinâmica

de sistemas ao nível da simulação de eventos discretos, eles não podem ser totalmente utilizados para a geração de um programa de controle real, envolvendo sensores e atuadores. Desta forma, programas de controle FMS são desenvolvidos tradicionalmente pelo método repetitivo de escrita, testes e depuração, até que os objetivos de controle sejam alcançados. Porém, esta é uma tarefa propensa a erros e demorada. Então, os autores propõem um modelo de controle FMS no nível de sensores e atuadores. Sendo possível a utilização deste para o desenvolvimento do programa de controle. O método proposto foi implementado e utilizado para realização de testes de sistemas FMS.

### 2.3 CONCLUSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA

O primeiro trabalho encontrado que aborda o tema simulação a eventos discretos para comissionamento de sistemas de controle foi Ericson (1987). Posteriormente, diversos autores apresentam estudos envolvendo a evolução da utilização desta abordagem. Nestes a simulação que tradicionalmente é utilizada na fase de concepção como uma ferramenta de análise, pode ser utilizada posteriormente como um emulador para teste de sistemas de controle.

Trabalhos como Dougall (1998), Auinger et al (1999) e McGregor (2002) apresentam a possibilidade de utilização da simulação para comissionamento de sistemas predominantemente de uma forma teórica. Mas, não apresentam o uso da simulação de forma integrada, quando o modelo para análise, desenvolvido durante a etapa de concepção é reaproveitado em todo ciclo de vida do projeto, como proposto por Okolnishnikov (2011). Já trabalhos como Park *et al* (2010), Han *et al* (2011) e Ko *et al* (2013) apresentam mais detalhes da aplicação, porém não utilizam a abordagem de forma integrada. Por outro lado, estes trabalhos utilizam a abordagem denominada comissionamento virtual, onde todo o sistema precisa ser modelado para a realização de testes. Isso torna a construção do emulador uma tarefa exaustiva, pois é necessário modelar todo o sistema.

Já os trabalhos de Harrison e Tilbury (2008) e Cardoso *et al* (2012), apresentam uma abordagem denominada comissionamento híbrido, onde parte do sistema real integrado ao modelo é utilizado para a realização dos experimentos,

não é necessário modelar toda a planta. Tal possibilidade gera uma redução significativa no tempo e esforço despendidos para a modelagem do sistema.

Sendo assim o presente trabalho tem como principal diferencial o uso da simulação de forma integrada na execução de todo ciclo de vida do projeto. O modelo construído durante a etapa de concepção é utilizado posteriormente para a construção do emulador que será utilizado nas etapas de desenvolvimento e teste do sistema de controle e supervisão. Posteriormente utilizado para o comissionamento e para o treinamento de operadores. Além disto, devido à possibilidade de utilização de um sistema híbrido, ou seja, utilizar parte do sistema real integrado ao modelo para a realização dos experimentos, não é necessário modelar toda a planta. Tal possibilidade gera uma redução significativa no tempo e esforço despendidos para a modelagem do sistema.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO FÍSICA DO SISTEMA

O sistema físico para a concepção da proposta deste trabalho é composto por estações piloto de manufatura que realizam operações típicas de sistemas de manufatura reais. No caso de alguma falha neste sistema os riscos e custos associados seriam menores que os gerados em sistema reais de grande porte, permitindo a execução de testes laboratoriais. O sistema inicialmente é composto por três estações e o projeto desenvolvido descreve a inclusão de uma quarta. A Figura 10 apresenta um desenho esquemático do sistema de manufatura após a execução do projeto de adição da nova estação. O indicador vermelho “A” apresenta a entrada da peça na estação em questão, o indicador vermelho “B” a saída da peça após o processamento pela estação.

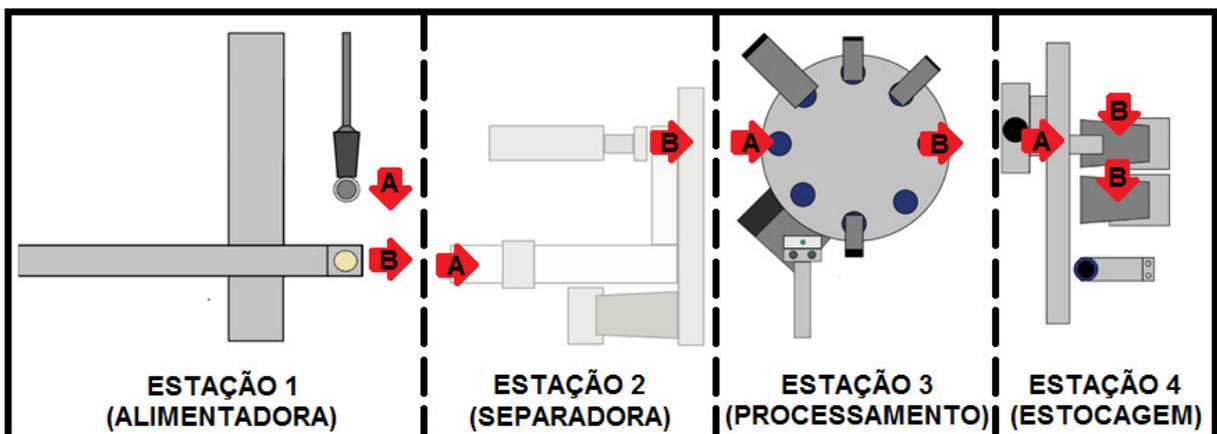
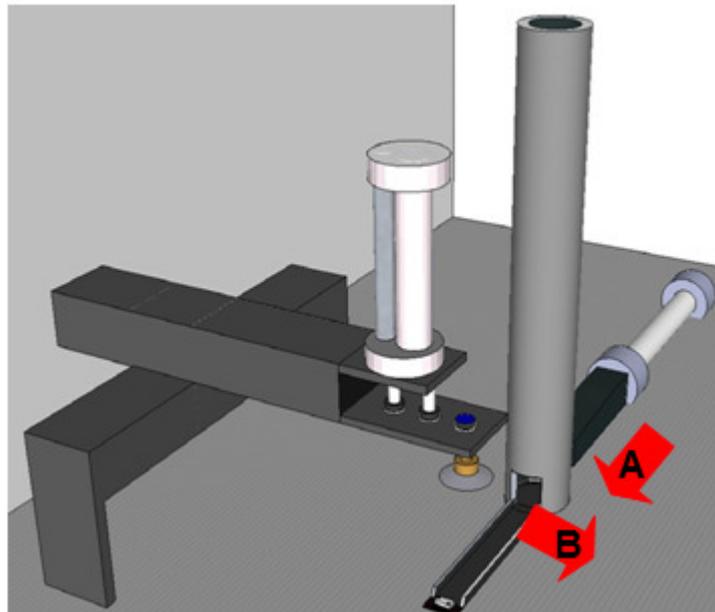


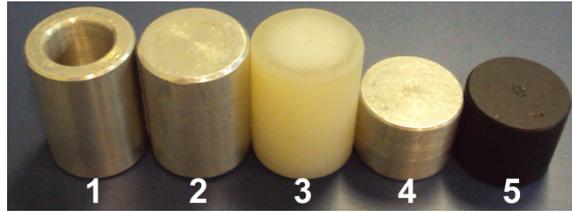
Figura 10: Desenho esquemático estações de manufatura

A primeira estação (Estação 1) denominada Alimentador é responsável pelo fornecimento de insumos as demais estações. É composta por um sistema de movimentação e um alimentador de peças. O sistema de movimentação possui dois atuadores lineares associados que permitem o deslocamento tanto horizontal em direção a próxima estação, atuador A1 (Eixo Y), quanto vertical, atuador A2 (Eixo Z), com o auxílio de uma ventosa. O alimentador possui um atuador linear que desloca a cada ciclo uma das diversas peças armazenadas para que seja levada pelo sistema de movimentação para a próxima estação. A Figura 11 apresenta um desenho esquemático da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída.



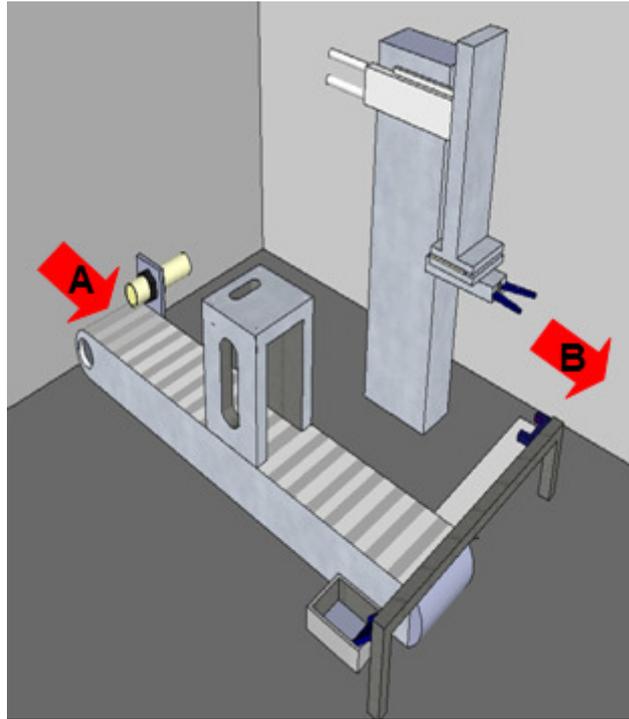
**Figura 11: Desenho esquemático Estação 1**

Cinco tipos de peças com características distintas podem ser fornecidas às demais estações: (1) metálicas grandes furadas; (2) metálicas grandes; (3) plásticas grandes; (4) metálicas pequenas; e (5) plásticas pequenas. As peças do tipo 2, 4 e 5 são consideradas defeituosas e devem ser descartadas durante o processo. As peças do tipo 1 passam por uma operação de polimento na Estação 3 e são estocadas. A peça do tipo 3 é estocada sem sofrer nenhum processamento. A Figura 12 apresenta os diferentes tipos de peças existentes.



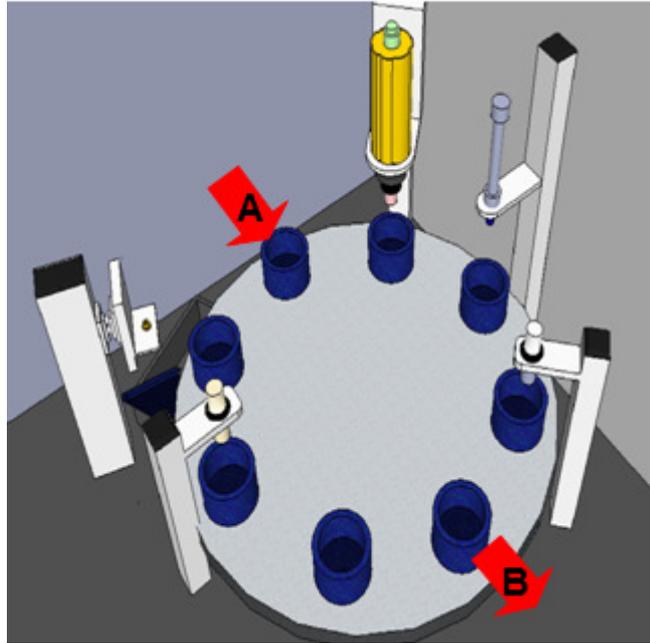
**Figura 12: Peças utilizadas no processo (1: metálica grande furada, 2: metálica grande, 3: plástica grande, 4: metálica pequena e 5: plástica pequena)**

A Estação 2, denominada Separador, é responsável pelo descarte de peças fora das especificações desejadas quanto ao tamanho (peças metálicas pequenas e peças plásticas pequenas). É composto por uma esteira transportadora, um sistema linear de deslocamento de peças e um sistema movimentação. O sistema linear de deslocamento de peças é constituído pelo atuador linear A1 (Eixo X) associado a uma guia. Já o sistema de movimentação é composto por dois atuadores lineares integrados e uma garra. O atuador A2 (Eixo Z) é responsável pelo movimento vertical da garra, enquanto o atuador A3 (Eixo Y) é responsável pelo horizontal em direção à próxima estação. A Figura 13 apresenta um desenho esquemático da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída. As peças são depositadas pela Estação 1 na esteira, esta esteira possui um sensor óptico por barreira instalado a uma altura maior que as peças consideradas defeituosas. Caso a peça que está sendo deslocada pela esteira não interrompa o feixe de luz do sensor, significa que esta peça está fora das especificações. Então, ao chegar ao sistema de deslocamento é enviada em direção ao silo para que seja descartada. Caso a peça acione o sensor óptico significa que possui tamanho dentro das especificações e ao chegar ao deslocador é enviada para o sistema de movimentação para que seja enviada para Estação 3.



**Figura 13: Desenho esquemático Estação 2**

A Estação 3, denominada Processamento e Separação, pode executar três operações distintas: polimento das peças metálicas furadas; deslocamento das peças plásticas; e descarte das peças metálicas sem furo. A estação é composta por uma mesa rotativa, um atuador de aferição de furo, uma retífica de polimento e um sistema de movimentação. O sistema de movimentação é construído por dois atuadores e uma garra. O atuador A1 (eixo Y) é responsável pelo movimento horizontal enquanto o atuador A2 (Eixo Z) é responsável pelo movimento vertical. A Figura 14 apresenta um desenho esquemático da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída.

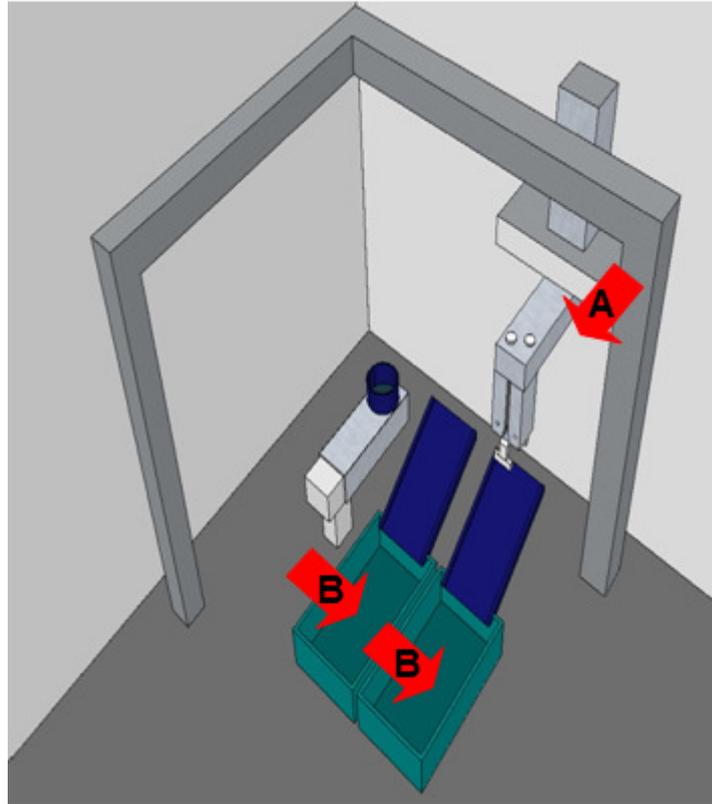


**Figura 14: Desenho esquemático Estação 3**

As peças enviadas pela Estação 2 são depositadas na mesa rotativa e deslocadas até o atuador de aferição de furo. Se a peça a ser aferida for furada, o atuador avança até atingir o fim de curso acionando o sensor. Neste caso, a peça é deslocada até a retífica para que sofra um processo de polimento e então seja deslocada para a posição de envio para Estação 4.

As peças não furadas são diferenciadas quanto ao material com auxílio de um sensor indutivo existente na mesa. Se o sensor é acionado significa que a peça é metálica, considerada defeituosa, então, ela é deslocada até o sistema de movimentação para que seja descartada. As peças plásticas são diretamente encaminhadas para a posição de envio para a próxima estação.

A Estação 4, denominada Estocagem, é responsável pelo armazenamento das peças. A estação é composta por um sistema de movimentação de peças e um sistema de pesagem. O sistema de movimentação é constituído por três atuadores integrados e uma garra. O atuador linear A1 (eixo X) é responsável pelo movimento horizontal, o atuador rotativo A2 (eixo Y) é responsável pelo avanço em direção à estação anterior e o atuador linear A3 (eixo Z) responsável pelo movimento vertical. O sistema de pesagem é constituído por um sensor de peso (Strain Gage) que possibilita que as peças sejam identificadas pela diferença de peso. A Figura 15 apresenta uma visão esquemática da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída.



**Figura 15: Desenho esquemático Estação 4**

Ao término do processamento de uma peça considerada dentro das especificações pela Estação 3, o sistema de movimentação se desloca para retirá-la. Esta peça é então deslocada para o sistema de pesagem. As peças metálicas furadas por serem mais pesadas são diferenciadas das peças plásticas. Caso a peça depositada no sistema de pesagem seja plástica, esta é deslocada pelo sistema de movimentação para o silo 1, caso contrário é deslocada para o silo 2.

A planta inicialmente utilizada para a realização dos testes é composta pelas estações 1, 3 e 4, a Estação 2 foi considerada como inexistente, como é apresentado na Figura 16. Esta não estava integrada às demais estações e o sistema operava sem um separador de peças pequenas. Sendo assim as peças enviadas pela Estação 1 eram diretamente depositadas na Estação 3.

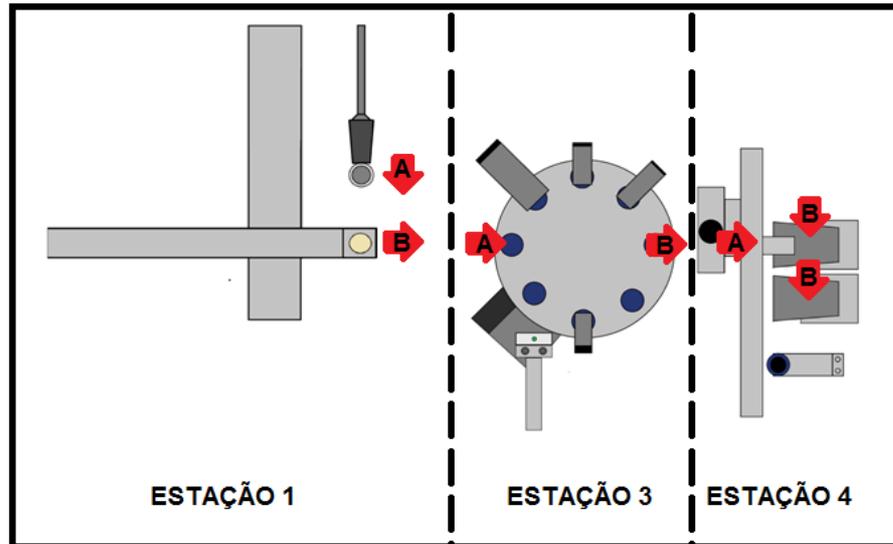


Figura 16: Sistema inicial

Isso permitia que peças fora das especificações dimensionais fossem enviadas para a Estação 3. Porém, não é previsto na operação desta estação o processamento destas peças. Então, quando uma peça defeituosa era depositada na estação o sistema era paralisado até que um operador retirasse esta peça do sistema manualmente. Apesar da baixa frequência de peças pequenas as paradas do sistema gerava um atraso no processamento destas.

De forma semelhante a uma indústria de manufatura real, diante da detecção do problema apresentado, iniciou-se um projeto de modificação da linha de produção. O projeto desenvolvido propôs a incorporação de uma nova estação que possibilitasse separar as peças defeituosas antes que essas fossem enviadas para a estação de processamento. Porém, um dos requisitos era que a linha de produção fosse mantida em funcionamento durante a maior parte do ciclo de vida do projeto, reduzindo assim os custos associados à inatividade do sistema.

### 3.2 METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para analisar os gargalos e o comportamento da nova estação da planta de processo, antes de seu desenvolvimento elaborou-se um modelo de simulação para análise. Este foi construído segundo a metodologia proposta por Banks *et al* (2009) através dos passos: formulação e análise do problema; planejamento do projeto;

modelo conceitual; tradução do modelo conceitual; verificação e validação; experimentação; documentação e apresentação dos resultados e testes.

O modelo conceitual, apresentado na página 64, foi traduzido para o software Ururau para a realização de simulações computacionais. Utilizou-se, além disso, a metodologia proposta por Sargent (2011) para a verificação e a validação do modelo. Vale ressaltar que o modelo computacional foi construído após o modelo conceitual está pronto, totalmente verificados e validados.

Para execução dos experimentos de análise, devido à simplicidade do sistema, foram utilizados predominantemente blocos básicos de modelo de simulação como o *process*. Já o modelo de emulação não utilizou o módulo *process*, tradicionalmente empregado para representação de ações em modelos de simulação. Para representar o acionamento dos sensores foi utilizado o módulo *assign*, enquanto a leitura dos valores de saída do controle foi realizada utilizando o módulo *hold*. Já o tempo entre os acionamentos foi representado utilizando o módulo *delay*. Além disto, enquanto o modelo para análise possibilita a execução de forma acelerada no tempo, ou seja, executar os experimentos de forma acelerada, o modelos de emulação precisou ser executado em tempo real. O modelo conceitual é descrito nas próximas seções.

Para execução dos testes é essencial o desenvolvimento de um modelo de simulação. Para isso, utilizou-se o software Ururau, disponível em: <<https://bitbucket.org/tulioap/Ururau/downloads>>.

A Figura 17 apresenta a arquitetura do software Ururau. Em todas as camadas, foi utilizada a linguagem Java. A biblioteca JSL fica na camada mais inferior e converte o modelo, que é composto por uma série de comandos de processo (Process View), para uma sequência de eventos discretos. A camada intermediária é o núcleo do Ururau, que é composto por comandos de processos específicos do JSL, como criação de entidades, prender (Seize), atraso (Delay), liberar (Release), dentre outros. A camada mais superior trata da conversão do modelo gráfico, que é composto por um grafo dirigido para uma sequência de comandos do núcleo do Ururau.

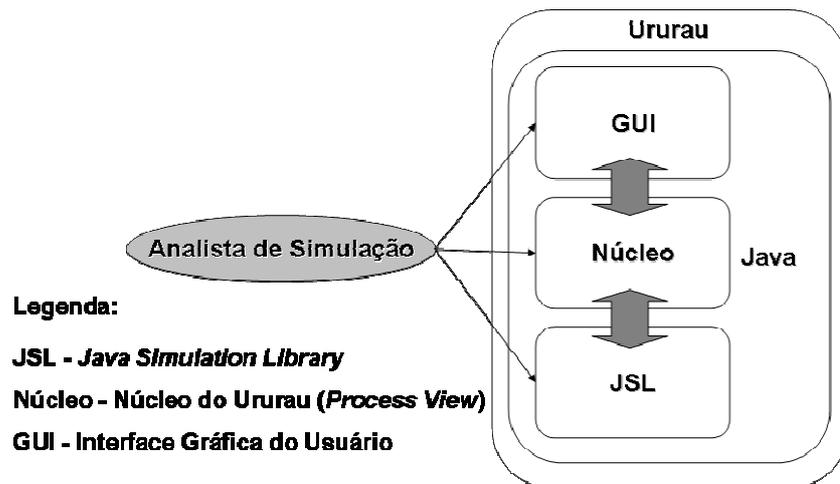


Figura 17: Arquitetura do Ururau

Os comandos do núcleo do Ururau se assemelham ao conjunto de templates básicos da maioria dos softwares de simulação. Além disso, o software tem uma interface gráfica, que opera estes comandos que compõem o núcleo do software que, por sua vez, opera o JSL, conforme a Figura 18.

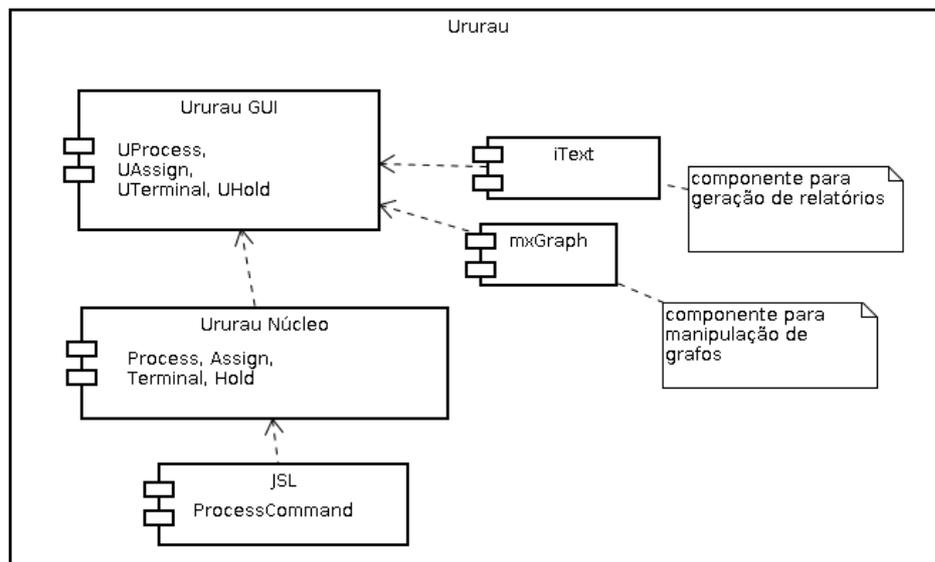
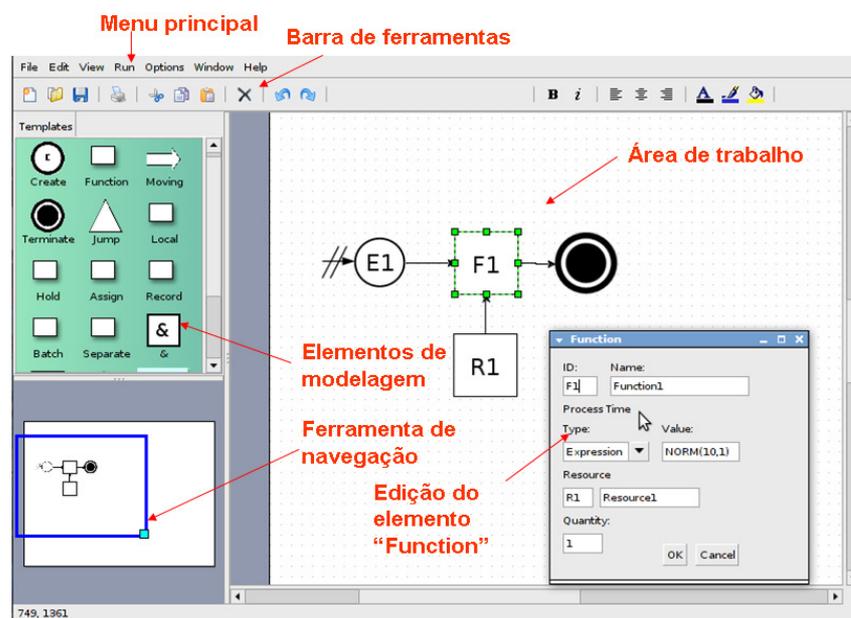


Figura 18: Diagrama de componentes do Ururau

Cada template é composto, internamente, por um ou mais comandos de processo, que estendem as funcionalidades do JSL.

O propósito da interface gráfica do simulador é facilitar a criação de modelos de simulação. Na Figura 19, à esquerda, fica o conjunto de funções ou Templates que são montados pelo analista na área de trabalho. Na parte inferior esquerda, é apresentada uma visão global do modelo, caso este não caiba na tela. A linguagem de representação do modelo é baseada no IDEF-SIM (MONTEVECHI *et al.*, 2010).



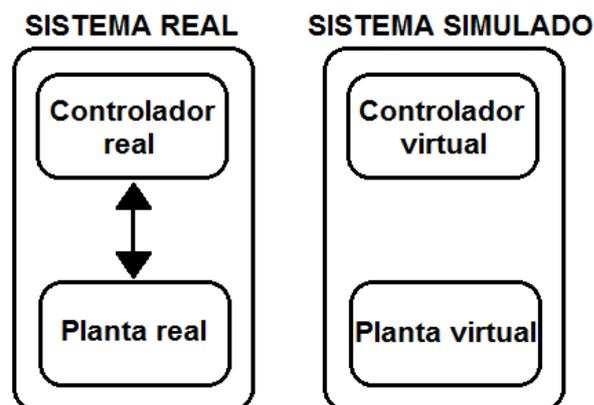
**Figura 19 Ambiente de desenvolvimento do Ururau**

Para a construção do modelo de simulação, o modelador precisa apenas arrastar e soltar com o mouse os elementos de modelagem para a área de trabalho, de acordo com a lógica do sistema em análise. A seguir, faz-se a edição do módulo clicando com o botão direito sobre o mesmo para abri-lo. Na caixa de edição, podem-se inserir os dados do modelo como os tempos dos eventos, as regras operacionais do sistema, entre outras funções.

### 3.3 METODOLOGIAS DE COMISSONAMENTO

Após a etapa de concepção e análise inicia-se a etapa de desenvolvimento, ou seja, construção física do novo sistema. Esta etapa envolve o desenvolvimento do sistema de controle e do sistema de supervisão e antecede a etapa de realização de testes, denominada comissionamento. Nos métodos tradicionais de comissionamento a planta de processo seria mantida em operação enquanto a nova estação fosse construída. Nesta etapa, tanto o sistema de controle quanto o sistema de supervisão poderiam ser desenvolvidos, mas os testes seriam efetuados apenas após a construção do sistema físico e integração destes. Neste método, a realização de testes utiliza a planta real, dispensando o desenvolvimento de um modelo para a etapa de comissionamento, denominado modelo de emulação. Entretanto, o risco de danos aos equipamentos é eminente, já que o sistema de controle desenvolvido pode conter erros e causar problemas como a colisão de atuadores. Isto causaria riscos não só ao novo sistema desenvolvido como também aos colaboradores.

A Figura 20 apresenta um esquema de como o comissionamento convencional é realizado. Neste a planta real é associada ao sistema de controle para a realização de testes.



**Figura 20: Comissionamento convencional**  
Adaptado de Smith e Cho (2008)

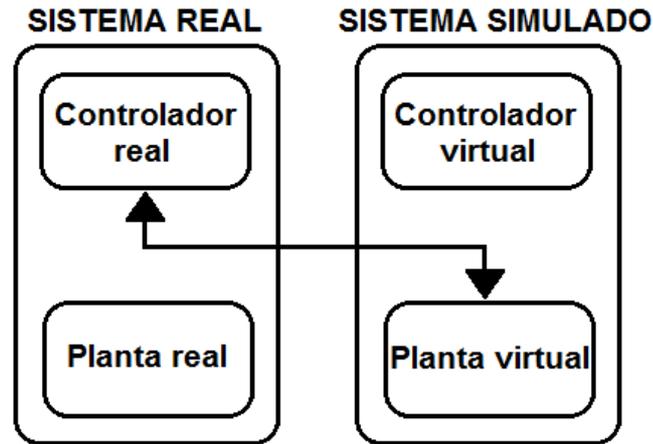
Outro fator relevante é que estes testes analisariam apenas a interação da nova estação com o sistema de controle e supervisão. Falhas existentes na interface desta com as demais estações seriam detectadas apenas no momento da inclusão da nova estação à planta de processo. Considerando que durante a execução destes testes, integrando o novo sistema à planta de processo, este ainda não teria

sido analisado quanto à confiabilidade, essa etapa é realizada com maior cuidado seguindo rigorosos e demorados procedimentos. Além disto, um dano a algum equipamento manteria a linha de produção parada não só durante a execução dos testes como também durante o reparo do equipamento. Mostrando que há grande probabilidade de atrasos na execução do projeto. A Figura 21 apresenta um cronograma hipotético da execução de um projeto.



**Figura 21: Cronologia da execução de projetos**

Logo, para tornar possível a construção de um sistema eficiente sem afetar, ou por em risco, a operação da planta, foram necessários métodos diferentes dos tradicionais para desenvolvimento e teste do sistema de controle e supervisão. Uma das possibilidades é modelar toda planta e realizar os testes utilizando modelos virtuais, realizando o chamando comissionamento virtual. Esta abordagem possibilita que o sistema seja testado antes de ser integrado à nova estação e que erros sejam detectados sem que estes causem riscos aos equipamentos desta estação. Além disto, resultaria na redução do tempo que a planta seria mantida parada. Pois, além dos testes individuais da estação, testes envolvendo a interação entre a nova estação e a planta seriam realizados de forma virtual. A Figura 22 apresenta um esquema de como o comissionamento virtual é realizado.

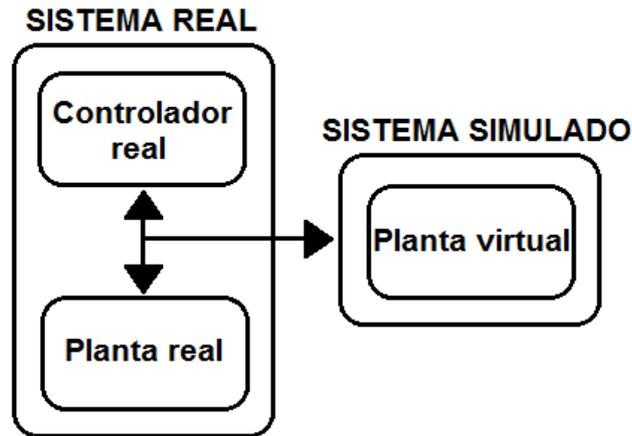


**Figura 22: Comissionamento virtual**  
 Adaptado de Smith e Cho (2008)

Isso manteria linha de produção em funcionamento durante toda etapa de desenvolvimento e realização de testes preliminares, necessitando parar o funcionamento da planta apenas para integração e realização de testes finais. Como durante a realização destes testes finais o sistema já teria sido testado tanto quanto ao funcionamento individual quanto a interação com os modelos virtuais estes seriam menos ariscados e não precisariam ser tão rigorosos.

Porém, modelar toda planta de processo é uma tarefa dispendiosa tanto de tempo quanto custo. Sendo assim, esta abordagem não é viável na maioria dos casos, principalmente em plantas de processos grandes e complexas. Torna-se, então, necessária uma abordagem que não necessite modelar a planta por inteiro.

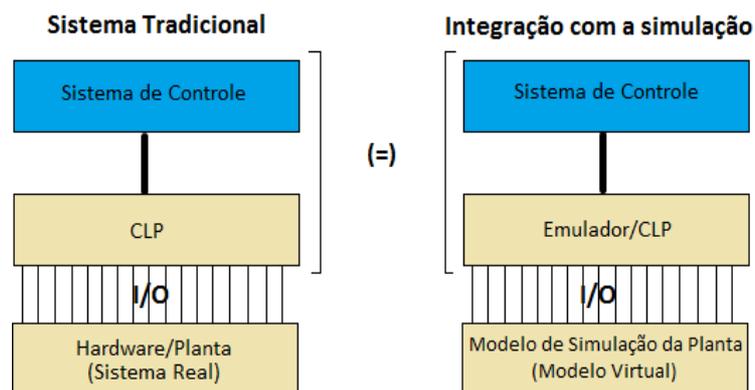
Nesse sentido, a abordagem denominada comissionamento híbrido é proposta. Nesta, não é necessário modelar todo o sistema reduzindo o custo e tempo despendido para elaboração do modelo. Apenas uma parte do sistema, que esta em fase de desenvolvimento ou apresenta algum risco, é modelada e integrada ao restante do sistema para a realização dos testes. A Figura 23 apresenta um esquema de como o comissionamento híbrido é realizado.



**Figura 23: Comissionamento Híbrido**  
Adaptado de Smith e Cho (2008)

### 3.4 COMISSIONAMENTO COM MODELOS DE SIMULAÇÃO

A simulação com sistema de controle é normalmente usada para o comissionamento *off-line* de sistemas de controle de plantas industriais. Isto possibilita a realização de testes em sistemas de controle sem a necessidade de parar a unidade industrial. A Figura 24 mostra a diferença básica entre o comissionamento tradicional e o comissionamento *off-line* de plantas industriais.

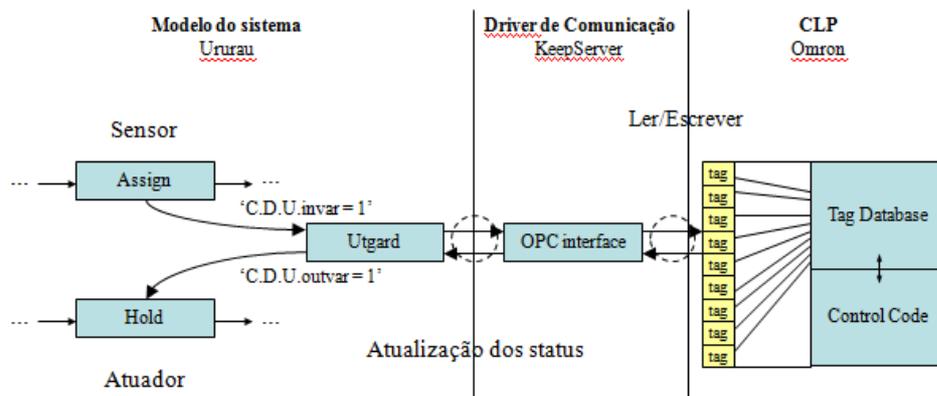


**Figura 24- Diferenças entre o comissionamento tradicional e o virtual**  
Fonte: Smith e Cho (2008)

A integração do Ururau com o servidor OPC é realizada com o cliente OPC Utgard. Disponível em: ([http:// openscada.org/projects/utgard](http://openscada.org/projects/utgard)). Este cliente OPC faz parte do software openSCADA que é um sistema supervisor e de aquisição de dados *open source* e independente de plataforma. O Utgard foi escolhido por ser um

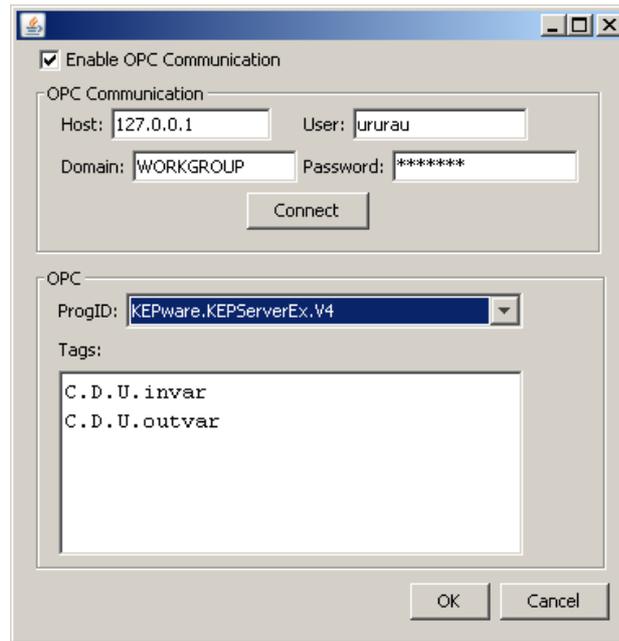
cliente OPC *open source* e 100% do código em Java, apesar de fazer interface com DCOM (*Distributed Component Object Model*) que usa código nativo do sistema operacional MS Windows® para acessar o servidor OPC. As tags OPC são como variáveis dentro do Ururau. Elas são definidas em um servidor OPC ou no cliente OPC que faz conexão com o PLC.

A Figura 25 ilustra de forma esquemática como é a integração entre o software Ururau e um PLC que seja utilizado em um típico sistema de controle. Onde, o modelo de simulação é integrado ao CLP através de um driver de comunicação.



**Figura 25- Integração modelo de simulação, Ururau e sistema de controle**  
Adaptado de Smith e Cho (2008)

Para o usuário, via interface gráfica, o acesso pode ser realizado através do menu Ferramentas e opção Comunicação OPC. É necessário criar uma conta de usuário Windows com as permissões de acesso utilizados para os componentes DCOM do servidor OPC escolhido. A comunicação será bem sucedida quando ao clicar em 'Conectar' a caixa de texto irá listar as tags pré-definidas no servidor OPC selecionado como mostra a Figura 26.



**Figura 26- Comunicação OPC do Ururau**

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 ESTRUTURA DE COMISSIONAMENTO PROPOSTA**

Os testes foram realizados em três etapas. Na primeira, integrou-se o modelo de simulação desenvolvido ao sistema de controle para realização de testes, tanto do modelo quanto do sistema de controle, chamado comissionamento virtual. Esta etapa além possibilitar avaliar erros existentes no funcionamento individual da estação possibilita validar o modelo desenvolvido. Na segunda etapa, integrou-se o modelo e o sistema de controle a planta de processo e realizou-se o comissionamento híbrido. Assim, além do funcionamento individual da estação é possível detectar falhas na interação da estação em questão com o restante do processo. Por fim, integrou-se a estação à planta de processo realizando os últimos testes do sistema, realizando o comissionamento tradicional.

Diante do problema detalhado na seção anterior, utilizou-se inicialmente o comissionamento virtual para auxiliar o desenvolvimento e teste dos sistemas de controle e supervisão da nova estação. Neste método, o controlador real é conectado a planta virtual como descrito na Figura 27. Esta abordagem possibilita a realização dos chamados testes individuais da estação. A execução destes teste é detalhada na sessão seguinte.



Figura 27: Comissionamento virtual da Estação 2

Durante esta etapa um modelo lógico da Estação 2 (modelo de simulação a eventos discretos no software Ururau) integrado a um modelo virtual da referida estação (sistema de supervisão no software Wizcon). É integrado a sistema de controle (CLP do fabricante OMRON) através de um servidor de comunicação OPC (KEPServer), permitindo que testes sejam realizados durante o desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão. Este sistema é detalhado na Figura 28.

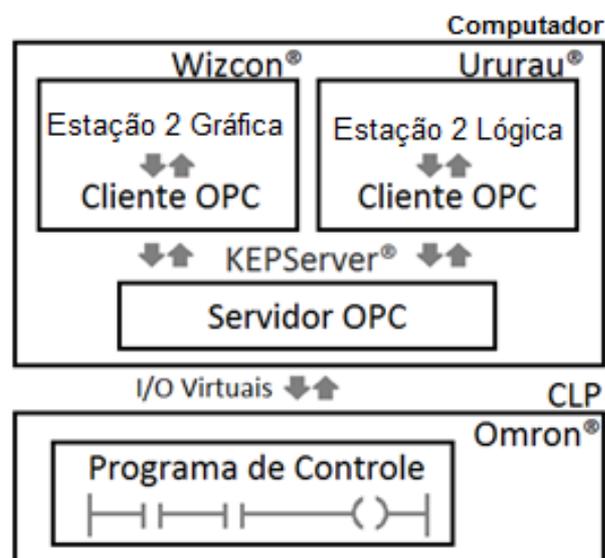


Figura 28: Esquema da integração do sistema híbrido

Após o desenvolvimento do sistema de controle e testes individuais utilizando o comissionamento virtual, realizou-se o comissionamento híbrido. Nesta abordagem, parte do sistema real que não apresenta risco de se realizar testes é integrada a um modelo de emulação. No caso específico do sistema utilizado, o modelo desenvolvido foi integrado através de um servidor de comunicação OPC ao CLP da respectiva estação. Uma rede de comunicação entre os CLP's (Rede de Controle) possibilitou a interação com as demais estações de forma virtual, não apresentando risco para a execução dos testes. O sistema é detalhado na Figura 29.

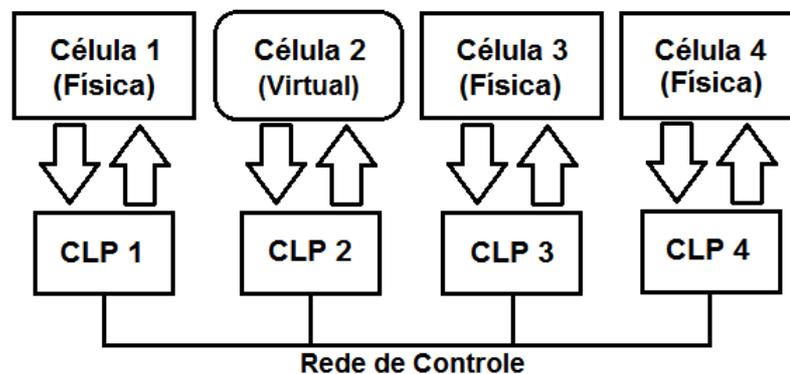
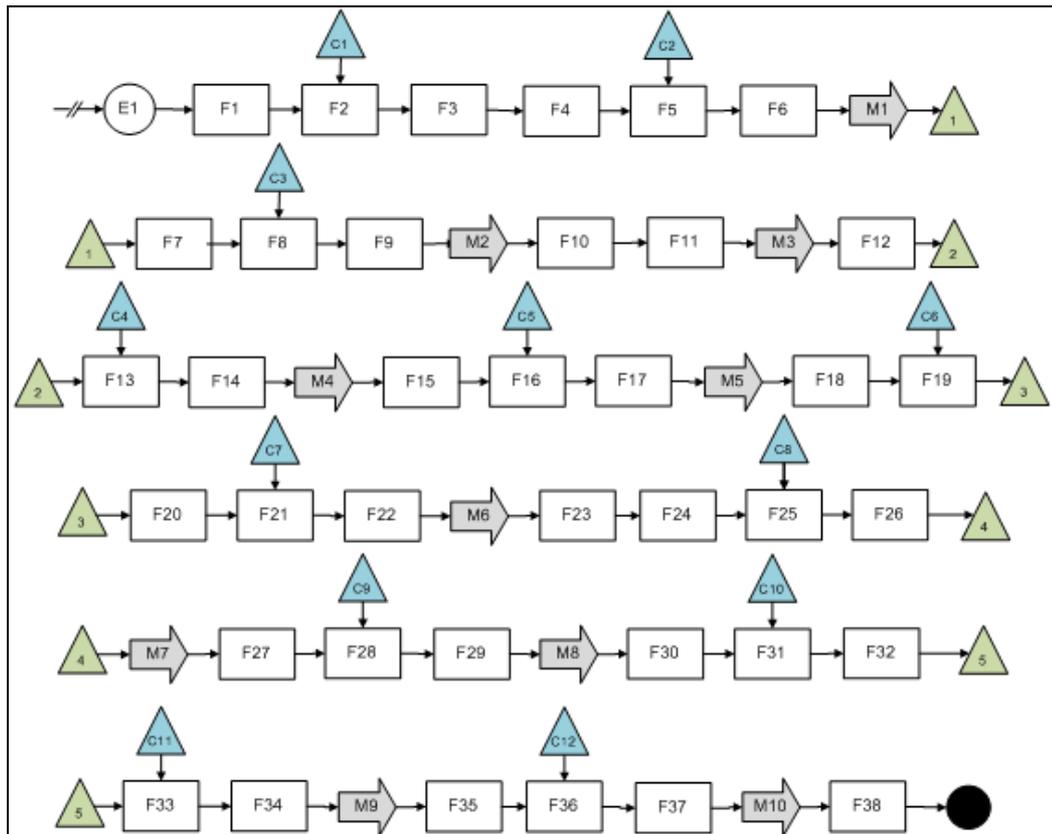


Figura 29: Esquema híbrido de integração das estações

#### 4.1.1 Modelo de simulação (emulador)

Como descrito nas seções anteriores, o desenvolvimento do sistema foi iniciado com a construção do modelo conceitual. Este foi desenvolvido na linguagem IDEF-SIM, proposta por Montevechi *et al* (2010). A Figura 30 apresenta o modelo conceitual desenvolvido para a Estação 2, pode-se perceber que a entidade E1 representa a entrada do sistema. Após o *start-up* da comunicação as entidades seguem por F1, onde todas as entradas são iniciadas com nível lógico idêntico ao do sistema real.



**Figura 30: Modelo conceitual Estação 2**

A função F2 recebe um sinal do software de programação do CLP com o status da variável RECUA\_X, que representa a saída que aciona o recuo da guia. Caso o sinal seja de nível lógico 1 o processo segue normalmente, caso contrário o processo é interrompido até que este seja acionado.

A função F3 atribui nível lógico 1 a variável X\_0, indicando que a guia atingiu o sensor de fim de curso e encontra-se recuada. A função F4 atribui nível lógico 1 a variável PECA\_INICIO\_ESTEIRA, indicando que o sensor indutivo foi acionado e existe peça entrando na esteira. A função F5 libera a passagem da entidade se a guia estiver sendo avançada, a partir de um sinal vindo do software de programação do CLP com a variável AVANCA\_X assumindo nível lógico 1. Ao passar pela função F6 é atribuído nível lógico 0 a variável X\_0, sinalizando que o sensor de fim de curso foi desacionado. M1 indica a movimentação da guia da posição recuada para a posição intermediária.

No momento em que a entidade chega à função F7 é atribuído nível lógico 1 a X\_INT, indicando que o sensor intermediário foi acionado e a guia está

centralizada. Seguindo o fluxo do processo, F8 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável MOTORESTEIRA, que representa a saída que aciona a esteira.

Estando a esteira acionada, a função F9 atribui nível lógico 0 a variável PECA\_INICIO\_ESTEIRA, indicando que o sensor indutivo foi acionado, e através da movimentação M2 a mesma está sendo deslocada sobre a esteira.

A função F10 atribui nível lógico 1 e F11 nível lógico 0 a variável PECA\_GRANDE, representando um pulso no sensor óptico de barreira do sistema real, que é ativado quando uma peça grande percorre a esteira. A movimentação M3 representa o deslocamento da peça do sensor óptico de barreira até o final da esteira.

A função F12 atribui nível lógico 1 a variável PECA\_GUIA, o que equivale ao acionamento do sensor óptico de barreira, presente no sistema real no interior da guia, e onde o mesmo indica que a peça já se encontra na guia. A função F13 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável RECUA\_X, que representa a saída que representa o retorno da guia para a posição inicial.

Então, a função F14 atribui nível lógico 0 a variável X\_INT, que indica que o sensor intermediário foi desacionado devido a movimentação M4 a guia está se movendo e deslocando a peça grande para o seu devido fluxo de processo.

A função F15 atribui nível lógico 1 a variável X\_0, sinalizando que o sensor de fim de curso foi acionado, o que através da lógica de programação do CLP emite o comando de parada da guia. Já a função F16 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável AVANCA\_Z, que representa a saída que aciona o atuador dupla haste. A função F17 atribui nível lógico 0 a variável Z\_0, indicando que o sensor do atuador dupla haste recuado, presente no sistema real, foi desacionado e através da movimentação M5 a garra está descendo.

A função F18 atribui nível lógico 1 a variável Z\_1, indicando que o sensor do atuador dupla haste avançado, presente no sistema real, foi acionado. A função F19 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável FECHA\_GARRA, que representa a saída que aciona o fechamento da garra.

Após o fechamento da garra, F20 atribui nível lógico 0 a variável GARRA\_ABERTA, indicando que o sensor de garra aberta, presente no sistema real, foi desacionado. A função F21 aguarda o sinal do software de programação do

CLP com o status da variável AVANCA\_Z, e sendo o mesmo igual a zero, segue-se o fluxo do processo.

A função F22 atribui nível lógico 0 a variável Z\_1 representando que a movimentação M6 esta realizando o recuo da garra. Então, a função F23 atribui nível lógico 0 para a variável PECA\_GUIA, representando que a peça foi retirada pela garra da guia, e a função F24 nível lógico 1 a variável Z\_0 representando que a garra esta recuada.

A função F25 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável AVANCA\_Y, que representa a saída que aciona o atuador guiado. A função F26 atribui nível lógico 0 a variável Y\_0, indicando que o sensor do atuador guiado recuado, presente no sistema real, foi desacionado e através da movimentação M7 o atuador guiado está avançando.

A função F27 atribui nível lógico 1 a variável Y\_1, indicando que o sensor do atuador guiado avançado, presente no sistema real, foi acionado. A função F28 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável AVANCA\_Z, que representa a saída que aciona o avanço do atuador dupla haste.

Se o nível lógico da variável AVANCA\_Z ==1, a função F29 atribui nível lógico 0 a variável Z\_0, indicando que o sensor do atuador dupla haste recuado, presente no sistema real, foi desacionado e através da movimentação M8 a garra está descendo.

A função F30 atribui nível lógico 1 a variável Z\_1, indicando que o sensor do atuador dupla haste avançado, presente no sistema real, foi acionado. A função F31 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável FECHA\_GARRA, que representa a saída que aciona o fechamento da garra.

Se o nível lógico da variável FECHA\_GARRA ==0, a função F32 atribui nível lógico 1 a variável GARRA\_ABERTA, indicando que o sensor de garra aberta está acionado e a peça grande foi liberada.

A função F33 aguarda o sinal do software de programação do CLP com o status da variável AVANCA\_Z, onde se a mesma possuir nível lógico 0, a função F34 atribui nível lógico 0 a variável Z\_1, indicando que o sensor do atuador dupla haste avançado foi desacionado e através da movimentação M9 a garra está subindo.

A função F35 atribui nível lógico 1 a variável Z\_0, indicando que o sensor do atuador dupla haste recuado foi acionado. A função F36 aguarda o sinal do software

de programação do CLP com o status da variável AVANCA\_Y, que representa a saída que aciona o atuador guiado. Se o nível lógico da variável AVANCA\_Y == 0, a função F37 atribui nível lógico 0 a variável Y\_1, indicando que o sensor do atuador guiado avançado foi desacionado e através da movimentação M10 o atuador está sendo recuado.

A função F38 atribui nível lógico 1 a variável Y\_0, indicando que o sensor do atuador guiado recuado foi acionado e o processo foi concluído. O Quadro 2 apresenta uma descrição do modelo conceitual da Estação 2.

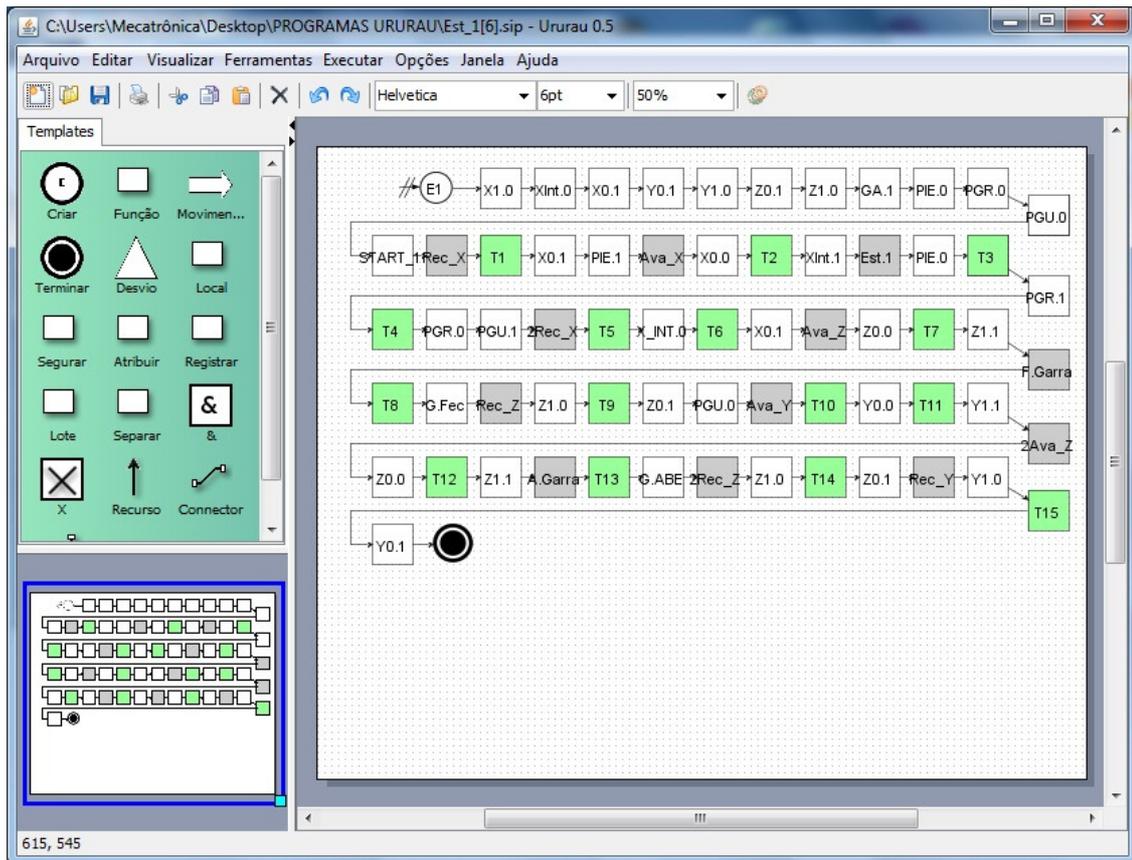
**Quadro 2: Tabela descritiva modelo conceitual Estação 2**

<b>ELEMENTOS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>PARÂMETROS</b>
<b>E1</b>	Peça grande	
<b>F1</b>	Inicializa entradas do sistema	
<b>F2</b>	Recebe o sinal da variável RECUA_X	RECUA_X
<b>F3</b>	Atribui nível lógico 1 a variável X_0	X_0=1
<b>F4</b>	Atribui nível lógico 1 a variável PECA_INICIO_ESTEIRA	P_INICIO_EST== 1
<b>F5</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_X	AVANCA_X
<b>F6</b>	Atribui nível lógico 0 a variável X_0	X_0=0
<b>F7</b>	Atribui nível lógico 1 a variável X_INT	X_INT=1
<b>F8</b>	Recebe o sinal da variável MOTORESTEIRA	MOTORESTEIRA
<b>F9</b>	Atribui nível lógico 0 a variável PECA_INICIO_ESTEIRA	P_INICIO_EST =0
<b>F10</b>	Atribui nível lógico 1 a variável PECA_GRANDE	PECA_GRANDE =1
<b>F11</b>	Atribui nível lógico 0 a variável PECA_GRANDE	PECA_GRANDE =0
<b>F12</b>	Atribui nível lógico 1 a variável PECA_GUIA	PECA_GUIA=1
<b>F13</b>	Recebe o sinal da variável RECUA_X	RECUA_X
<b>F14</b>	Atribui nível lógico 0 a variável X_INT	X_INT=0
<b>F15</b>	Atribui nível lógico 1 a variável X_0	X_0=1
<b>F16</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_Z	AVANCA_Z

<b>F17</b>	Atribui nível lógico 0 a variável Z_0	Z_0=0
<b>F18</b>	Atribui nível lógico 1 a variável Z_1	Z_1=1
<b>F19</b>	Recebe o sinal da variável FECHA_GARRA	FECHA_GARRA
<b>F20</b>	Atribui nível lógico 0 a variável GARRA_ABERTA	GARRA_ABERT A=0
<b>F21</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_Z	AVANCA_Z
<b>F22</b>	Atribui nível lógico 0 a variável Z_1	Z_1=0
<b>F23</b>	Atribui nível lógico 1 a variável Z_0	Z_0=1
<b>F24</b>	Atribui nível lógico 0 a variável PECA_GUIA	PECA_GUIA=0
<b>F25</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_Y	AVANCA_Y
<b>F26</b>	Atribui nível lógico 0 a variável Y_0	Y_0=0
<b>F27</b>	Atribui nível lógico 1 a variável Y_1	Y_1=1
<b>F28</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_Z	AVANCA_Z
<b>F29</b>	Atribui nível lógico 0 a variável Z_0	Z_0=0
<b>F30</b>	Atribui nível lógico 1 a variável Z_1	Z_1=1
<b>F31</b>	Recebe o sinal da variável FECHA_GARRA	FECHA_GARRA
<b>F32</b>	Atribui nível lógico 1 a variável GARRA_ABERTA	GARRA_ABERT A=1
<b>F33</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_Z	AVANCA_Z
<b>F34</b>	Atribui nível lógico 0 a variável Z_1	Z_1=0
<b>F35</b>	Atribui nível lógico 1 a variável Z_0	Z_0=1
<b>F36</b>	Recebe o sinal da variável AVANCA_Y	AVANCA_Y
<b>F37</b>	Atribui nível lógico 0 a variável Y_1	Y_1=0
<b>F38</b>	Atribui nível lógico 1 a variável Y_0	Y_0=1
<b>M1</b>	Movimento da guia da posição para a posição intermediária	
<b>M2</b>	Movimento da peça da posição inicial até o meio da esteira	
<b>M3</b>	Movimento da peça do meio da esteira até o final da mesma	
<b>M4</b>	Movimento da peça, da intermediária para posição recuada	
<b>M5</b>	Movimento de descida da garra	

<b>M6</b>	Movimento de subida da garra	
<b>M7</b>	Movimento avanço atuador guiado	
<b>M8</b>	Movimento de descida da garra	
<b>M9</b>	Movimento de subida da garra	
<b>M10</b>	Movimento recuo atuador guiado	
<b>C1</b>	Libera o processo se RECUA_X=1	RECUA_X=1
<b>C2</b>	Libera o processo se AVANCA_X=1	AVANCA_X=1
<b>C3</b>	Libera o processo se MOTORESTEIRA=1	MOTORESTEIRA =1
<b>C4</b>	Libera o processo se RECUA_X=1	RECUA_X=1
<b>C5</b>	Libera o processo se AVANCA_Z=1	AVANCA_Z=1
<b>C6</b>	Libera o processo se FECHA_GARRA=1	FECHA_GARRA =1
<b>C7</b>	Libera o processo se RECUA_Z=1	RECUA_Z=1
<b>C8</b>	Libera o processo se AVANCA_Y=1	AVANCA_Y=1
<b>C9</b>	Libera o processo se AVANCA_Z=1	AVANCA_Z=1
<b>C10</b>	Libera o processo se FECHA_GARRA=0	FECHA_GARRA =0
<b>C11</b>	Libera o processo se RECUA_Z=1	RECUA_Z=1
<b>C12</b>	Libera o processo se RECUA_Y=1	RECUA_Y=1

Após construção, verificação e validação do modelo conceitual este foi traduzido para o software Ururau para a construção do modelo de emulação. A Figura 31 apresenta uma imagem da tela do software Ururau após a tradução do modelo conceitual. Nota-se uma grande semelhança entre o modelo computacional e o conceitual, isso se dá pelo fato de o software Ururau ter desenvolvimento do modelo baseado em IDEF-SIM assim como o modelo conceitual.



**Figura 31: Modelo computacional em Ururau**

Após desenvolvimento do modelo de emulação este foi integrado ao sistema de controle e supervisão. Para isto, foram utilizadas 2 redes de comunicação, a primeira tem por objetivo permitir a troca de informações entre os CLP's, utilizando o padrão físico RS-422. O protocolo da camada de enlace utilizado foi o serial link. Esta rede possibilita a interligação dos CLP's considerados escravos, ao CLP mestre, os dados compartilhados pelos escravos são armazenados em endereços de memória do mestre. A segunda rede utilizada permite a troca de informações entre o modelo de simulação e o sistema de controle. O padrão de comunicação físico utilizado foi o RS 232 e o protocolo da camada de enlace host link. A Figura 32 apresenta um desenho esquemático da rede de controle e troca de dados entre o sistema de controle e o modelo de simulação.

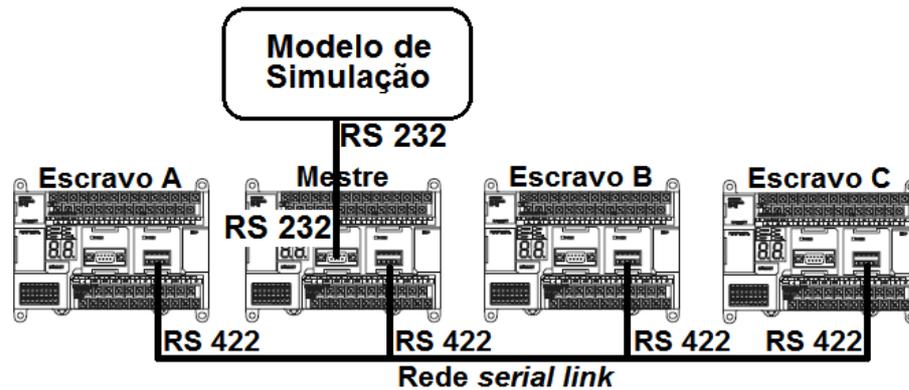


Figura 32: Esquema das redes de comunicação utilizadas

#### 4.1.2 Sistema de controle e supervisão

O modelo virtual foi desenvolvido utilizando o próprio sistema de supervisão utilizando o software de supervisão Wizcon. Já para construção das imagens foi utilizado o software Google SketchUp. Integrou-se, então, os 2 sistemas de controle e de supervisão utilizando um servidor de comunicação OPC, como descrito anteriormente. A Figura 33 apresenta uma imagem do da tela de supervisão da Estação 2, que serviu como modelo gráfico para o ambiente construído.

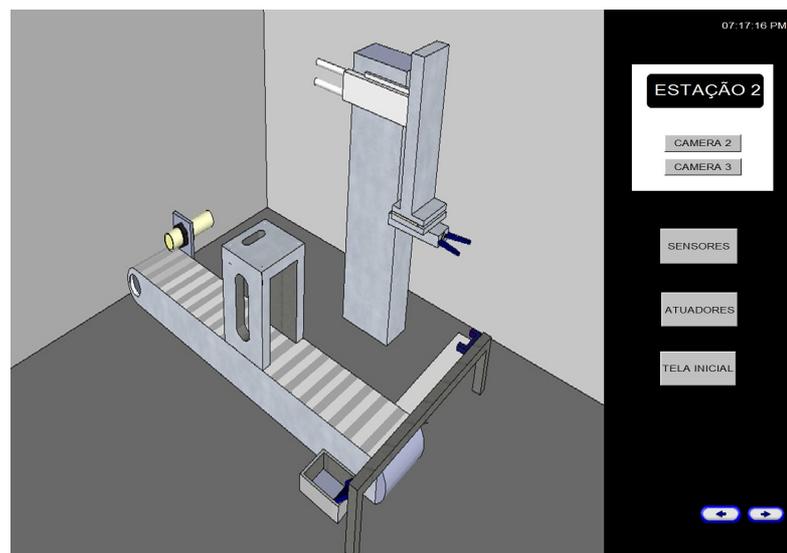
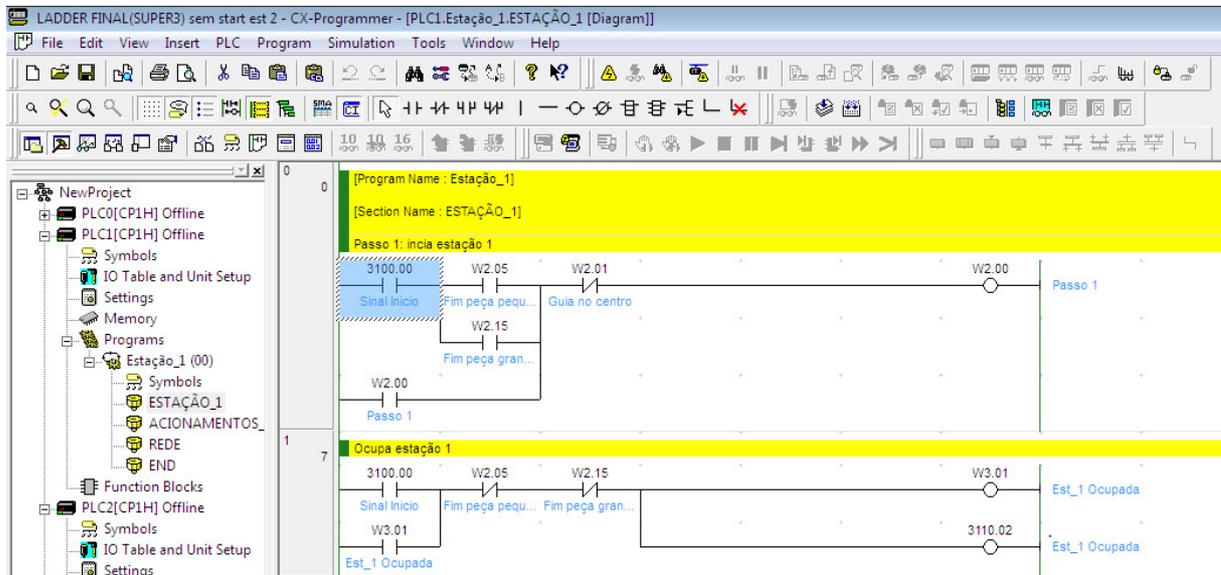


Figura 33: Tela de supervisão Estação 2

O sistema de controle foi desenvolvido em diagrama ladder, como mostra a Figura 34. Os controladores utilizados nas estações foram o CP1H, do fabricante Omron.



**Figura 34: Diagrama Ladder Estação 2**

Os equipamentos utilizados são de uso didático e assim são construídos em escala reduzida. Existem ainda mecanismos como a limitação da energia do circuito de força, tanto pneumático quanto elétrico, que reduzem o risco em caso de erros da programação. Isto permitiu a não utilização uma metodologia que possibilitasse a construção de uma lógica de controle mais robusta, método formal, como as redes de petri. Porém, em um sistema com equipamentos mais robustos, de porte industrial, é altamente aconselhável a sua utilização durante o desenvolvimento do programa de controle. Além disto, o uso de um modelo formal possibilitaria que a partir do conhecimento prévio do correto funcionamento do sistema fosse possível gerar falhas e facilmente detectá-las.

Após construção e integração do sistema, 3 (três) falhas a serem detectadas foram inseridas no programa de controle, diagrama Ladder, em pontos intuitivamente considerados críticos para o correto funcionamento do sistema. Os pontos escolhidos mesclam tanto simultaneidade de sinais de atuadores de uma mesma estação (apenas uma falha), quanto de estações distintas que se interagem (duas das três falhas).

## 4.2 DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS

Para testar o ambiente híbrido desenvolvido, composto pelo modelo de simulação e pelo sistema de controle, foram inseridos no sistema três erros de lógica, tipicamente encontrados em plantas industriais, como apresentado no Quadro 3. O primeiro erro foi inserido na Estação 1. O segundo foi provocado na interação entre as Estações 1 e 2. Já o terceiro, de forma semelhante ao segundo, foi inserido na interação entre as Estações 2 e 3.

**Quadro 3: Erros inseridos no programa de controle**

	Estação 1	Estação 2	Estação 3	Estação 4
Erro 1	-	Individual	-	-
Erro 2	Interação		-	-
Erro 3	-	Interação		-

Para a comunicação entre as estações, utilizou-se o sistema de comunicação que normalmente é utilizado em sistemas industriais, ou seja, um sinal lógico operado entre controladores. Assim, no caso dos testes realizados, foi gerado um sinal vindo da Estação 1 para o modelo de simulação. O referido sinal, então, inicia a operação da Estação 2, virtualmente. Com isso, pôde-se analisar a interação da Estação 1 e Estação 2.

A utilização do modelo de simulação integrado ao sistema de controle permitiu avaliar uma situação típica e indesejada que pode ocorrer em sistemas automatizados, devido à interferência provocada pela simultaneidade de movimentos entre estações. No caso específico do ambiente proposto, esta interferência ocorreu apenas virtualmente. Com isso, pôde-se testar as operações sem que houvesse o contato físico e, conseqüentemente, o risco de danos aos equipamentos.

### 4.2.1 Testes preliminares (comissionamento virtual)

Durante os testes preliminares, não se utilizou todo o sistema para realização dos testes. Foi utilizada apenas a estação simulada integrada ao sistema de controle, realizando, assim, o comissionamento *hardware in the loop*. Porém, este tipo de teste não considera a interação entre as estações, parte que oferece os riscos mais potenciais ao sistema.

Dos 3 (três) erros inseridos na lógica 1 (um), deles foi detectado, durante a realização do comissionamento *hardware in the loop*, um erro individual da Estação 1. Este erro gerava o inesperado acionamento da guia deslocadora de peças enquanto a esteira ainda era mantida em movimento, como ilustra a Figura 35. Este erro poderia danificar tanto o mecanismo da esteira, quanto o da guia. Como esperado, este teste detectou apenas erros locais, comprovando a limitação do *hardware in the loop* convencional quanto a erros na interface.

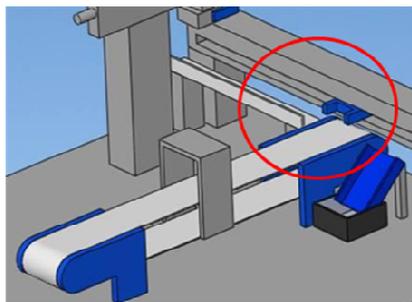


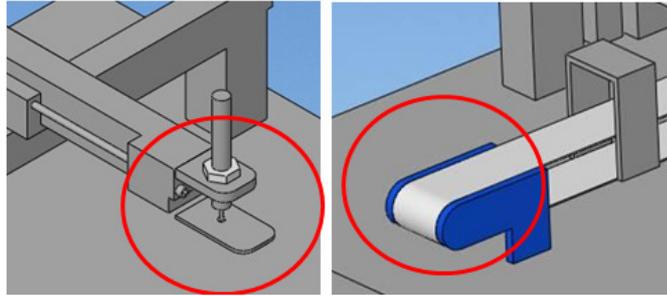
Figura 35- Erro individual Estação 1

#### 4.2.2 Testes utilizando o comissionamento híbrido

No comissionamento híbrido, o modelo foi integrado às estações reais, para realização dos testes, possibilitando a análise da interação entre as estações. Durante esse teste, ao fim da operação da Estação 1, a mesma gerou um sinal para a Estação 2 virtual, permitindo o início da operação, porém, sem interação física, evitando o risco de danos devido a falhas na transição. Como a Estação 2 estava sem suprimento de energia, mesmo se houvesse um erro na lógica e a inesperada simultaneidade de movimentos dos atuadores, não representaria risco aos equipamentos.

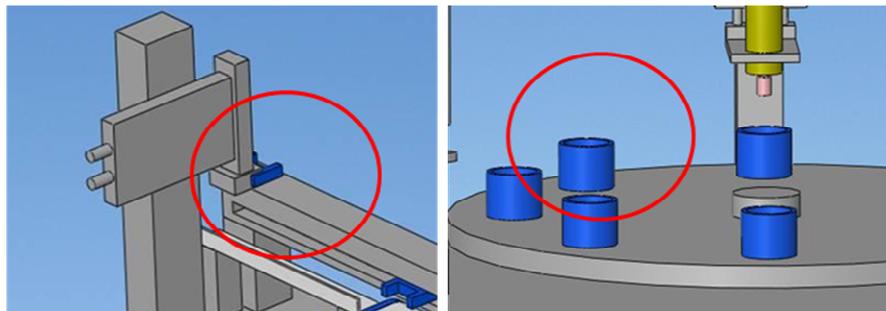
Nesta etapa, foram detectados 2 (dois) erros não detectados pelo comissionamento virtual. No primeiro deles, a esteira da Estação 2 era acionada

enquanto a Estação 1 realizava o movimento para depositar a peça na referida esteira. Este erro causaria danos tanto ao mecanismo da esteira, quanto ao do atuador responsável por depositar as peças. A Figura 7 ilustra o erro detectado. Como no momento dos testes a Estação 2 era mantida sem suprimento de energia, o erro não gerou danos ao equipamento.



**Figura 36- Erro interação Estações 1 e 2**

O outro erro foi detectado durante a interação entre as Estações 2 e 3. Neste, a mesa rotativa da Estação 3 era acionada enquanto a Estação 2 depositava a peça, como ilustra a Figura 8. Tal falha poderia causar sérios danos ao mecanismo de ambas as estações, caso não fosse detectada durante a etapa de comissionamento.



**Figura 37- Erro interação Estações 2 e 3**

Após o comissionamento híbrido da planta, testes físicos foram realizados para aferir se a lógica de controle desenvolvida, utilizando o processo simulado, controlaria a planta física. Neste teste, todas as estações foram utilizadas. Durante estes testes, o suprimento de energia de todas as estações era mantido,

representado a etapa denominada de operação assistida. A planta se comportou como esperado, comprovando a eficiência do comissionamento híbrido.

#### 4.3 AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS TESTES

Os testes realizados utilizando o comissionamento virtual e posteriormente o comissionamento híbrido possibilitaram a detecção dos erros inseridos no programa de controle. Os testes foram iniciados com a execução do comissionamento virtual, visando a detecção de falhas individuais da estação. Como esperado, o comissionamento virtual detectou apenas a falha individual da Estação 2, comprovando que esta abordagem não possibilita a detecção de falhas na interação com as demais estações, conforme descrito no Quadro 4.

**Quadro 4: Erros detectados x teste realizado**

Teste\Erro	Erro Individual Estação 2	Erro Interação Estações 1 e 2	Erro Interação Estações 2 e 3
Comissionamento Virtual	detectado	não detectado	não detectado
Comissionamento Híbrido	-	detectado	detectado

Eliminado o erro detectado pelo comissionamento virtual realizou-se o comissionamento híbrido. Este possibilitou a análise da interação entre as estações, desta forma, como esperado, os outros dois erros inseridos foram detectados com esta abordagem. O primeiro deles na interação entre as estações 1 e 2 e o outro na interação entre as estações 2 e 3.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 CONCLUSÕES**

O ambiente híbrido construído utilizando modelos de simulação a eventos discretos e estações de manufatura, possibilitou o desenvolvimento e a realização de testes dos sistemas de controle e supervisão. O sistema desenvolvido com o auxílio do referido ambiente comportou-se de forma satisfatória. Após análise e correção dos erros detectados, a planta foi colocada em funcionamento e não apresentou falhas.

O projeto foi iniciado com a construção de um modelo para análise da nova estação de manufatura. O modelo foi desenvolvido utilizando o software livre Ururau, considerado o primeiro software de simulação nacional. O referido modelo foi utilizado durante a etapa de concepção do projeto para execução de experimentos para avaliar o fluxo das peças pela estação, detecção de gargalos e outros parâmetros.

Após análise do comportamento do novo sistema, iniciou-se a execução da construção física deste. Então, o modelo utilizado para análise foi modificado para que representasse não o comportamento da planta de forma geral, mas dos equipamentos automáticos desta, constituindo o denominado modelo de emulação. O modelo de emulação foi integrado aos softwares de controle e supervisão, com o auxílio de uma rede de comunicação padrão 422 e um servidor OPC, constituindo o referido ambiente.

Com o auxílio do ambiente construído, desenvolveu-se de forma integrada o sistema de controle e o sistema de supervisão. Foi possível realizar testes destes durante o desenvolvimento permitindo que sua construção fosse menos empírica, e

com uma menor propensão a erros. Após o desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão iniciou-se a etapa de testes, denominada comissionamento. O primeiro teste realizado foi o comissionamento virtual da Estação 2. Este possibilitou analisar o comportamento dos sistemas de controle e supervisão da referida estação de forma individual. Erros puderam ser detectados e corrigidos sem o uso da estação física. Porém, este teste não possibilita analisar a interface entre a estação analisada e as demais. Para isso, realizou-se o comissionamento híbrido, que permitiu que testes integrados da interação da nova estação com a planta de processo fossem realizados de forma menos arriscada.

Desta forma, pode-se dizer que o ambiente híbrido de testes proposto, possibilita que o sistema de controle e supervisão seja desenvolvido de maneira mais segura. E que testes deste sistema sejam realizados de forma mais estruturada, gerando uma redução no tempo de execução das modificações e no custo envolvido.

## 5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Devido à dificuldade de acesso a uma planta de processo real, uma planta em escala reduzida foi utilizada para a realização dos testes da abordagem apresentada. Os equipamentos de controle utilizados, os erros inseridos e os experimentos realizados são, apesar disso, condizentes com sistemas reais.

O modelo desenvolvido durante a etapa de concepção e as análises realizadas por estes não são detalhados no presente trabalho. Parte-se se ponto no qual o modelo para análise está desenvolvido a planta de processo esta em fase de construção e este modelo é modificado para o desenvolvimento do sistema de controle e supervisão.

Não foram realizados testes exaustivos do ambiente proposto, desta forma, a existência de erros distintos dos analisados poderia não ser detectada.

Os equipamentos utilizados para a construção do ambiente de testes são de uso didático, porém possui funcionamento semelhante aos equipamentos reais, inclusive um controlador de porte industrial.

Por outro lado, uma alternativa que se apresentou durante a realização do presente trabalho foi a perspectiva de ser utilizar o mecanismo híbrido de teste como

uma ampliação das possibilidades de sistemas a serem utilizados no ensino de sistemas de controle.

### 5.3 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a importância de avaliar o desempenho do software Ururau para a construção de modelos de emulação, comparações mais detalhadas do desempenho deste com softwares comerciais tradicionalmente utilizados para esta aplicação (Arena e AutoMod) é uma potencial sugestão de trabalhos futuros.

A utilização de uma planta real para a realização de testes e avaliação da abordagem proposta é uma sugestão potencial visando a utilização confiável em plantas de processos de grande porte.

Avaliar através da abordagem proposta o comportamento da planta e testar o impacto da integração de uma heurística visando a otimização do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUINGER, F.; VORDEWINKLER, M.; BUCHTELA, G. Interface drive domain - independent modeling architecture for “soft-comissioning” and “reality in the loop”. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Phoenix, AZ – USA. **Proceedings...**, Phoenix, AZ – USA: WSC, 1999, p. 2544-2552.

BANKS, J.; CARSON, S. J.; NELSON, B. L. **Discrete-event system simulation**, New York: Prentice Hall, 2007.

BASTOS, P. J. T; CARVALHO JR., E.; CARDOSO L. D.; RANGEL J. J. A.; TAVARES, L. O. Simulação a Eventos Discretos para Comissionamento de Sistemas de Controle, In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (17), Bauru, SP, 2010, **Anais...**, Bauru-SP: UNESP, 2010. p. 1-16.

CARDOSO, L. D.; BASTOS, P. J. T. **Ambiente híbrido utilizando simulação a eventos discretos e células de manufatura para desenvolvimento e teste de sistemas de controle**. 2012. 118f. Monografia.(Graduação em Engenharia e Controle de Automação) Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 2012.

\_\_\_\_\_. Ambiente híbrido utilizando simulação a eventos discretos e estações de manufatura para desenvolvimento e teste de sistemas de controle. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA. Campina Grande, PB, 2012. **Anais...** Campina Grande – Pb: SBA, 2012. p. 1-7.

\_\_\_\_\_. Discrete event simulation for integrated design in the production and commissioning in manufacturing systems, In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Washington, DC – USA. **Proceedings...**, Washington, DC – USA: WSC. 2013, p. 2544- 552.

CARROLL, D. Rapid-prototyping emulation system co-emulation modelling interface for SystemC real-time emulation. In: WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS (12), Heraklion – Greece, 2008. **Proceedings...**, Heraklion – Greece: WSEAS, 2008. p. 691-697.

CHIOU, R.; KWON, Y.; KIZIRIAN, R.; DORDAI, M.; DAVIS, B. A. Modeling and experimental verification of PLC codes in a robotics and mechatronics course. In: AMERICAN SOCIETY FOR ENGINEERING EDUCATION (118). Vancouver, BC – Canada, 2011, **Proceedings ...** Vancouver, BC- Canadá: AMSEE, 2011.

DIOGO, R. A; et al. A computational control implementation environment for automated manufacturing systems, **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 50, n. 22, p. 6272–6287, 2012.

DOUGALL, D. J. Applications and benefits of real-time I/O simulation for PLC and PC control systems. **ISA Transactions**. v. 36, n.4, p. 305-311, 1998. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00190578>>. Acessado em 14 de julho de 2014.

ERICKSON, C. Simulation, animation, and shop-floor control. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Atlanta, GA – USA, 1987, **Proceedings...**, Atlanta, GA-USA: WSC, p. 649-653.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. 2.ed. São Paulo: Visual Books, 2008.

HAN, K. H.; CHOI, S. H.; PARK, J. W.; LEE, J. W. Object-oriented execution and monitoring of industrial control logic for automated manufacturing system. In: WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS, CONTROL AND MANUFACTURING (11), Technology, Veneza – Itália, 2011, **Proceedings...** Veneza – Itália: WSEAS, 2011. p. 987-993.

\_\_\_\_\_. Rapid Virtual Prototyping and Operational Monitoring of PLC-Based Control System, **International Journal of Mathematics and Computers in Simulation**. v. 5, n.3, p.198-205, 2011. Disponível em: <<http://www.naun.org/main/NAUN/mcs/>>. Acessado em 14 de julho de 2013.

HAN, K. H.; PARK, J. W.; YOO, S. K.; LEE, G. Virtual prototyping and operational monitoring of PLC-based control system. In: WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY, France, Paris, 2010. **Proceedings...** France, Paris: WASET, 2010. p. 997-1003.

HARRISON, W. S.; TILBURY, D. Virtual fusion: hybrid process simulation and emulation-in-the-loop. In: BIENNIAL ASME CONFERENCE ON ENGINEERING SYSTEMS DESIGN AND ANALYSIS (9), Haifa – Israel, 2008, **Proceedings....** Haifa – Israel: ASME, 2008. p. 1-8.

HITCHENS, M. W.; RYAN, T. K. Direct connect emulation and the project life cycle, In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Washington, DC – USA, 1989, **Proceedings...**, Washington, DC – USA: WSC, 1989. p. 843-847.

JOHNSTONE, M.; CREIGHTON, S.; NAHAVANDI, S. Enabling industrial scale simulation / emulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Washington, DC – USA, 2007, **Proceedings...** Washington, DC – USA: WSC, 2007. p. 1028-1034.

KO, M.S, PARK, S. C., CHOI, J.; CHANG, M. New modelling formalism for control programs of flexible manufacturing systems, **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 51, n. 6, p.1668-1679, 2013.

KO, M. S.; PARK, S. C.; WANG, G. Visual validation of PLC programs. In: EUROPEAN CONFERENCE ON MODELLING AND SIMULATION (22), Nicosia – Cyprus, 2008, **Proceedings...** Nicosia – Cyprus: ECMS, 2008. p. 410-415.

\_\_\_\_\_. . Machine control level simulation of an AS/RS in the automotive industry. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Baltimore, MD – USA, 2010, **Proceedings...**, Baltimore, MD – USA: WSC, 2010. p. 1727-1738.

KOFLANOVICH, N.; HARTMAN, P. Live modernizations of automated material handling systems: bridging the gap between design and startup using emulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Baltimore, MD – USA, 2010, **Proceedings...** Baltimore, MD – USA: WSC, 2010. p. 1716-1726.

KOO, L. J., PARK, C. M., LEE, C. H., PARK, S. C.,; WANG, G. Simulation framework for the verification of PLC programs in automobile industries, **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 49, n. 16, 4925-4943, 2011.

LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis** 4.ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2007.

LEBARON, T.; THOMPSON, K. Emulation of a material delivery system. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Washington, DC – USA, 1998, **Proceedings ...**, Washington,DC-USA: WSC, 1998. p.1055-1060.

LOCK, D. **Project management**. 9 ed. Missouri – USA: Gower, 2007.

MC-GREGOR, I. How to reduce AMHS control system costs with simulation models. In: INTERNATIONAL MODELING AND SIMULATION, Palm Springs, CA – USA, 2003, **Proceedings...** Palm Springs, CA-USA: IASTED, 2003.

\_\_\_\_\_. The relationship between simulation and emulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, San Diego, CA – USA, 2002. **Proceedings...**, San Diego, CA – USA WSC, 2002. p. 1601-1612.

MELLO, B. A. **Modelagem e simulação de sistemas**, Santo Ângelo: URI, 2007.

MEYER, T.; MAYER, G.; PÖGE, C. Integration of emulation functionality into an established simulation object library. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Berlin – GER, 2012, **Proceedings...** Berlin – GER: WSC, 2012. p. 1-11.

MILES, T. I.; SIDDELEY. Using discrete-event computer simulation to test control systems, In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Washington, DC – USA, 1989, **Proceedings...**, Washington, DC – USA: WSC, 1989. p. 848-858.

MUELLER, G. Using emulation to reduce commissioning costs on a high speed bottling line. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Arlington, VA – USA, 2001, **Proceedings...** Arlington, VA – USA: WSC, 2001. p. 1461-1462.

MULLER, D. Automod™ – providing simulation solutions for over 25 years. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Phoenix, AZ – USA, 2011, **Proceedings...**, Phoenix, AZ – USA: WSC, 2011p. 39-51.

OKOLNISHNIKOV, V. Development of process control systems with the use of emulation models, **International Journal of Mathematics and Computers in Simulation**, v. 5, n. 6, p. 553-560, 2011. Disponível em: <<http://www.naun.org/main/NAUN/mcs/>>. Acessado em 14 de julho de 2013.

\_\_\_\_\_. . Emulation models for testing of process control systems, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED MATHEMATICS, SIMULATION

AND MODELLING, Stevens Point, WI – USA, 2011, **Proceedings...** Stevens Point, WI – USA: ICAMSM, 201. p. 80-83.

PARK, H.; KWAK, J.; WANG, G.; PARK, S. C. Plant model generation for PLC simulation, **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 5, p.1517-1529, 2010. Disponível: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540802577961>>. Acessado em 14 de julho de 2013.

PARK, S. C.; PARK, C. M.; WANG, G. A PLC programming environment based on a virtual plant. **International Journal of Advanced Manufacturing**. v.. 39, p.1262-1270, 2008. <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540802577961>>. Acessado em 14 de julho de 2013.

PEIXOTO, T. A.; RANGEL, J. J. A.; MATIAS, I. O.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. C. Ururau - Um Ambiente para Desenvolvimento de Modelos de Simulação a Eventos Discretos. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, 2013. (no prelo). Disponível em:< [www.uff.br/mcct/?bGluaGFz](http://www.uff.br/mcct/?bGluaGFz)>. Acessado em: 14 de julho de 2014.

PHILLIPS, R.; MONTALVO, B. Using emulation to debug control logic code. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Baltimore, MD – USA, 2010, **Proceedings...** Baltimore, MD – USA:WSC, 2010. p. 1673-1677.

PÎRVU, B.; BONDREA, I.; SIMION, C.; MARIN, R, Modelling and control of an automated module using discrete event simulation and object-based modeling, **Academic Journal of Manufacturing Engineering**, v. 8, n. 2, p.63-68, 2010. Disponível em: < [http://www.eng.upt.ro/auif/Lucrari\\_PDF2\\_2010/Pirvu.pdf](http://www.eng.upt.ro/auif/Lucrari_PDF2_2010/Pirvu.pdf)>. Acessado em: 14 de julho de 2014.

RENGELINK, W.; SAANEN, Y. A. Improving the quality of controls and reducing costs for on-site adjustments with emulation: an example of emulation in baggage handling. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, San Diego, CA – USA, 2002, **Proceedings ...**, San Diego, CA – USA: WSC, 2002. p.1689-1694.

ROHRER, M. W. Maximizing simulation ROI with AutoMod. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, New Orleans, LA – USA, 2003, **Proceedings...**, New Orleans, LA – USA: WSC, 2003. p. 201- 209.

\_\_\_\_\_. Simulating reality using AutoMod. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, San Diego, CA – USA, 2002, **Proceedings...**, San Diego, CA – USA: WSC, 2002. p. 173-181.

SCHIESS, C. Emulation: debug it in the lab – not on the floor. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Arlington, VA – USA, 2011, **Proceedings...**, Arlington, VA – USA: WSC, 2011. p. 1463-1465.

SEIDEL, S.; DONATH, U.; HAUFE, J. Towards an integrated simulation and virtual commissioning environment for controls of material handling systems. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Berlin – GER, 2012, **Proceedings...**, Berlin – GER: WSC, 2012. p. 1-12.

SMITH, J.S.; CHO, Y. Offline commissioning of a PLC-based control system using Arena. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Miami, FL – USA, 2008, **Proceedings ...**, Miami, FL – USA: WSC, 2008p. 1802-1810.

SWAIN J. J. Simulation software survey. OR/MS Today. **Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS)**, USA. 2007. Disponível: <<http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation1.html>>. Acessado em 18 de Janeiro de 2012.

VERSTEEGT, C.; VERBRAECK, A. The extended use of simulation in evaluating real-time control systems of AGVs and automated material handling systems. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, San Diego, CA – USA, 2002, **Proceedings...**, San Diego, CA – USA: WSC, 2002. P. 1659-1666.

## **APÊNDICE A: PUBLICAÇÃO ORIGINADA COM O PROJETO DE PESQUISA**

A.1: ARTIGO PARA O INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH:

### **SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE E COMISSIONAMENTO EM SISTEMAS DE MANUFATURA**

#### **RESUMO**

A simulação a eventos discretos, tradicionalmente utilizada para análise durante a concepção de projetos, tem se apresentado como uma abordagem potencial para auxiliar a etapa de comissionamento de sistemas. Desta forma, o presente trabalho propõem a utilização de um modelo de simulação a eventos discretos e estações de manufatura como um ambiente híbrido de emulação para desenvolvimento, avaliação e teste de sistemas de controle. O modelo foi desenvolvido utilizando um software *open source* (FOSS) que permite a integração do modelo desenvolvido ao sistema através de um servidor de comunicação OPC. Para testar a abordagem proposta uma planta de manufatura didática composta por quatro estações foi utilizada, onde uma das referidas estações foi modelada e utilizada de forma virtual. A abordagem se mostrou adequada e através desta foi possível desenvolver o sistema de controle e supervisão de forma mais interativa. Foi possível também, detectar falhas no sistema de controle que poderiam danificar o sistema e apresentar risco aos operadores. O ambiente proposto se mostrou

também como uma alternativa para ser utilizada no ensino de sistemas de controle. Ou seja, pode ser utilizado para treinamento de operadores sem comprometer o correto funcionamento do sistema real, possibilitando simular situações de falhas.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria manufatureira tem passado por profundas modificações, as plantas de processo se tornam cada vez maiores, mais complexas, necessitam de constantes modificações e envolvem cada vez mais pessoas, com um tempo reduzido para a tomada de decisão. Portanto, as indústrias precisam projetar, modificar suas instalações, fabricar novos produtos e entregá-los aos consumidores em um intervalo de tempo cada vez menor (HIBINO, 2002). Neste contexto, diversos autores apresentam abordagens potenciais para auxiliar a tomada de decisão, dentre elas a simulação a eventos discretos.

A simulação a eventos discretos, tradicionalmente utilizada para análise durante a concepção de projetos, tem se apresentado como uma abordagem potencial para auxiliar a etapa de comissionamento de sistemas. Desde o fim da década de 80, trabalhos como Erickson (1987); Hiitchens e Ryan (1989) destacam a possibilidade de utilização desta abordagem para a emulação de processos. Apesar de não apresentarem detalhes da utilização, devido a limitações tecnológicas da época, os autores apresentam a possibilidade de utilizar esta abordagem de forma integrada em diversas etapas do projeto.

Atualmente, autores como Ko *et al* (2013), Diogo *et al* (2012) e Okolnishnikov (2011) apresentam mais detalhes desta aplicação, limitando-a, no entanto, a determinada etapa do projeto. Por outro lado, uma abordagem que tem mostrado potencial aplicabilidade é a utilização de modelos de simulação integrados a uma parte do sistema real, numa aplicação denominada comissionamento híbrido. Esta permite que apenas a parte do sistema que se deseja analisar, ou a parte do sistema que apresenta risco ao ser utilizada na realização de testes dos experimentos seja modelada, reduzindo o tempo e custo despendido na elaboração do modelo (HARRISON E TILBURY, 2008 e CARDOSO *et al*, 2013). Desta forma, a crescente necessidade de modificação das linhas de produção poderia ter uma atenuação no tempo e custo despendido. Essas constantes modificações geram

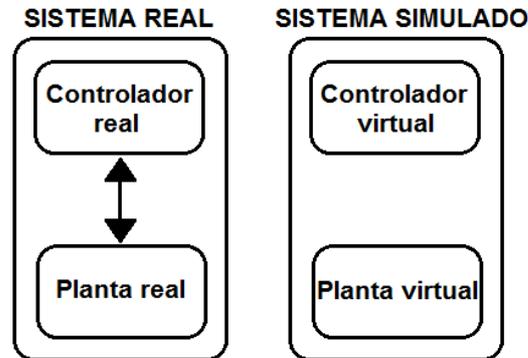
elevados custos para as empresas, principalmente devido a planta de processo não estar em operação durante a execução das modificações.

O presente trabalho, de forma distinta aos demais citados, propõe a utilização da simulação a eventos discretos como uma ferramenta integrada na execução de projetos de modificação e construção de plantas de processo automatizadas. Utilizando um software livre para desenvolvimento do modelo de simulação a eventos discretos, denominado URURAU. O referido software foi desenvolvido utilizando a biblioteca de simulação JSL.apresentada por Rosseti, 2009. Neste contexto busca-se utilizar a simulação de forma integrada durante todo o ciclo de vida do projeto. O modelo desenvolvido na etapa de concepção é utilizado durante a etapa de desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão e posteriormente na etapa de comissionamento e, ainda, para treinamento de operadores.

## 2. MÉTODOS DE COMISSIONAMENTO

Após a etapa de concepção e análise inicia-se a etapa de execução, ou seja, construção física do novo sistema. Esta etapa envolve o desenvolvimento do sistema de controle e do sistema de supervisão e antecede a etapa de realização de testes, denominada comissionamento. Nos métodos tradicionais de comissionamento a planta de processo é mantida em operação enquanto a nova estação é construída. Segundo Smith e Cho (2008), nesta etapa, tanto o sistema de controle quanto o sistema de supervisão poderiam ser desenvolvidos, mas os testes são efetuados apenas após a construção do sistema físico e integração destes. Neste método, a realização de testes utiliza a planta real, dispensando o desenvolvimento de um modelo para a etapa de comissionamento, denominado modelo de emulação. Entretanto, o risco de danos aos equipamentos é eminente, já que o sistema de controle desenvolvido pode conter erros e causar problemas como a colisão de atuadores. Isto pode causar riscos não só ao novo sistema desenvolvido como também aos colaboradores. A Figura 1 apresenta um esquema de como o comissionamento convencional é realizado. O lado esquerdo da figura representa o sistema real, constituído do controlador e da planta. O lado direito representa o sistema simulado (virtual), composto pelo controlador virtual e a planta virtual. Nesta abordagem a planta real é associada ao sistema de controle para a

realização de testes, as setas representam esta conexão, o sistema simulado não é utilizado nesta.



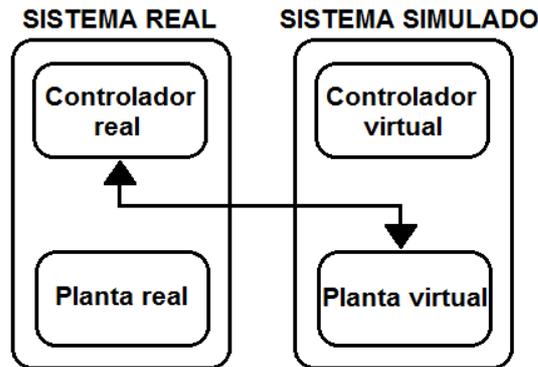
**Figura 1: Comissionamento Tradicional**

Adaptado de Smith e Cho (2008)

Outro fator relevante é que estes testes analisariam apenas a interação da nova estação com o sistema de controle e supervisão. Falhas existentes na interface desta com as demais estações seriam detectadas apenas no momento da inclusão da nova estação à planta de processo. Considerando que durante a execução destes testes, integrando o novo sistema à planta de processo, este ainda não teria sido analisado quanto à confiabilidade, essa etapa é realizada com maior cuidado seguindo rigorosos e demorados procedimentos. Além disto, um dano a algum equipamento manteria a linha de produção parada não só durante a execução dos testes como também durante o reparo do equipamento. Mostrando que há grande probabilidade de atrasos na execução do projeto.

Logo, para tornar possível a construção de um sistema eficiente sem afetar, ou por em risco, a operação da planta, foram necessários métodos diferentes dos tradicionais para desenvolvimento e teste do sistema de controle e supervisão. Uma das possibilidades é modelar toda planta e realizar os testes utilizando modelos virtuais, realizando o chamado comissionamento virtual. Esta abordagem possibilita que o sistema seja testado antes de ser integrado à nova estação e que erros sejam detectados sem que estes causem riscos aos equipamentos desta estação. Além disto, resultaria na redução do tempo que a planta seria mantida parada. Pois, além dos testes individuais da estação, testes envolvendo a interação entre a nova estação e a planta seriam realizados de forma virtual. A Figura 2 apresenta um

esquema de como o comissionamento virtual é realizado. O controlador do sistema real, representado no lado esquerdo, é conectado a planta virtual do sistema simulado, lado direito, a seta representa essa conexão.



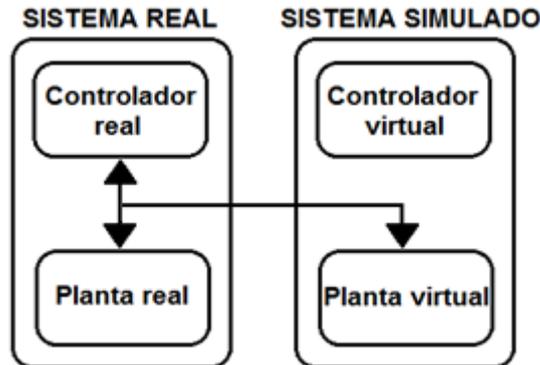
**Figura 2: Comissionamento Virtual**

Adaptado de Smith e Cho (2008)

A referida abordagem manteria a linha de produção em funcionamento durante toda etapa de desenvolvimento e realização de testes preliminares, necessitando parar o funcionamento da planta apenas para integração e realização de testes finais. Como durante a realização destes testes finais o sistema já teria sido testado tanto quanto ao funcionamento individual quanto a interação com os modelos virtuais estes seriam menos ariscados e não precisariam ser tão rigorosos.

Porém, modelar toda planta de processo é uma tarefa dispendiosa tanto de tempo quanto custo. Sendo assim, esta abordagem não é viável em muitas situações, principalmente em plantas de processos grandes e complexas. Desta forma, é necessária uma abordagem que não necessite modelar a planta por inteiro, neste contexto o comissionamento híbrido é proposto. Neste, não é necessário modelar todo o sistema reduzindo o custo e tempo despendido para elaboração do modelo. Apenas uma parte do sistema, que esta em fase de desenvolvimento ou apresenta algum risco, é modelada e integrada ao restante do sistema para a realização dos testes. A Figura 3 apresenta um esquema de como o comissionamento híbrido é realizado. Nesta pode-se obter a melhor das suas situações, usar um modelo para representar uma parte ariscada do sistema e utilizar

parte do sistema real. Neste o controlador real e parte da planta real são conectados a planta virtual, as setas representam essa conexão.



**Figura 3: Comissionamento Híbrido**

Adaptado de Smith e Cho (2008)

### 3. SOFTWARE URURAU

O software de simulação utilizado no presente trabalho teve sua concepção baseada no trabalho de Rossetti (2008), que descrevia a estrutura interna de uma biblioteca de software de código aberto e livre de custos, denominada *Java Simulation Library* (JSL). Segundo o autor, esta biblioteca poderia ser empregada por desenvolvedores, com a finalidade de auxiliar a construção de modelos de SED, de forma ágil e segura, sem a necessidade de utilização de softwares comerciais. Na conclusão, uma das sugestões do autor para trabalhos futuros seria a construção de uma *graphical user interface* (GUI), que poderia dar suporte e facilitar a utilização do JSL por desenvolvedores menos experientes em linguagens de programação como Java. O software URURAU pode ser acessado livremente em: <https://bitbucket.org/tulioap/Ururau/downloads>

No entanto, uma vez compreendido o funcionamento do software JSL, testado e construída a GUI, como proposto por Rossetti, o que se obteve com a pesquisa foi um pequeno e simples software, que pôde ser utilizado como um ambiente para a construção de pequenos modelos de SED. Neste novo ambiente computacional, os modelos puderam ser elaborados, facilmente, a partir de uma linguagem gráfica de fluxogramas. O software foi batizado, então, de Ururau, que é o nome de uma lenda do século XVIII, originária da cidade de Campos dos Goytacazes, RJ.

Os recursos atuais do software Ururau são:

- camada superior da GUI, já integrada à JSL, onde podem ser construídos os modelos de simulação de forma gráfica (sem necessidade de digitação de linhas de comando);
- componentes para a realização de comunicação dos modelos de simulação com controladores lógicos programáveis (CLP);
- ferramenta acoplada para a realização de testes de aderência de funções estatísticas de distribuição de probabilidades com dados coletados em campo; e
- ferramenta para exibição dos dados de saída em forma de relatórios com gráficos.

A Figura 4 apresenta a interface gráfica do Ururau e seus recursos básicos: Menu principal; barra de ferramentas; elementos de modelagem; e navegador.

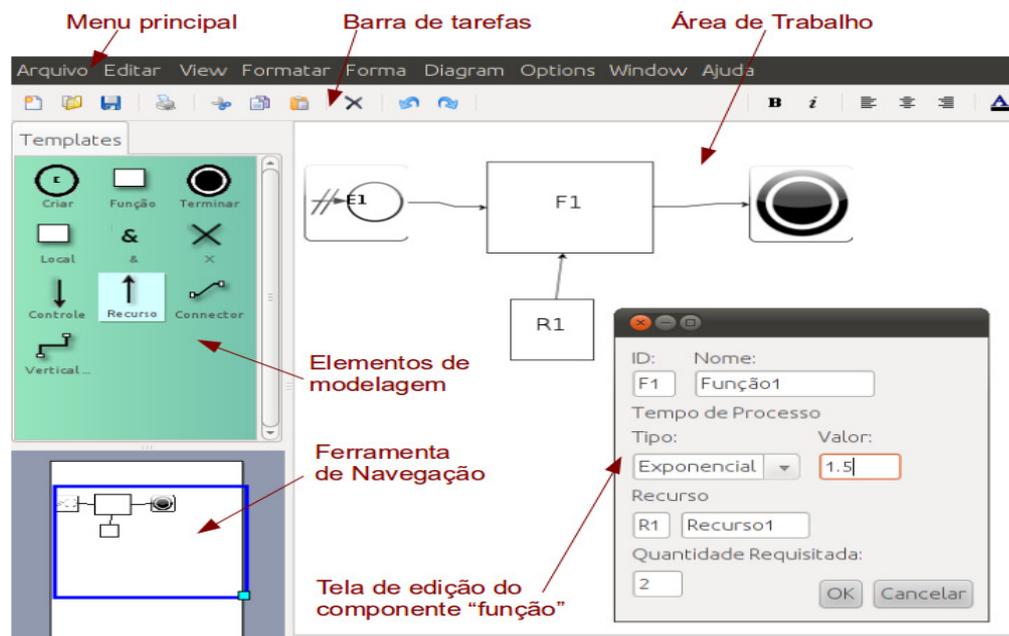
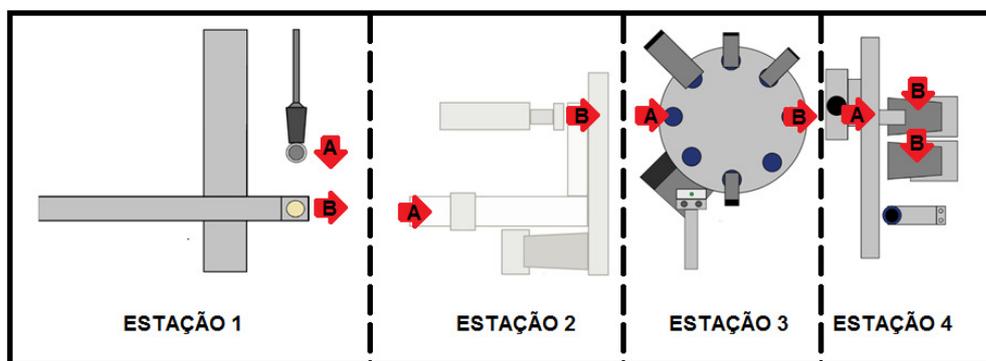


Figura 4: Interface gráfica URURAU

#### 4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema físico para a concepção da proposta deste trabalho é composto por estações piloto de manufatura, utilizadas para ensino e treinamento, que realizam

operações típicas de sistemas de manufatura reais. No caso de alguma falha neste sistema os riscos e custos associados são menores que os gerados em sistema reais de grande porte, permitindo a execução de testes laboratoriais. O sistema inicialmente é composto por três estações e o projeto desenvolvido descreve a inclusão de uma quarta. A Figura 5 apresenta um desenho esquemático do sistema de manufatura após a execução do projeto de adição da nova estação, onde a seta A apresenta a entrada da peça na estação e a seta B a saída da peça após o processamento pela estação. (Estação 2).

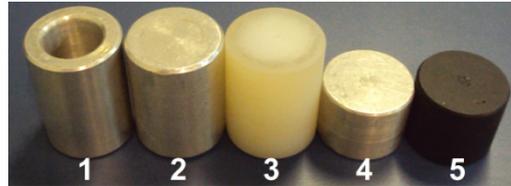


**Figura 5: Desenho esquemático estações de manufatura (Estação 1: Alimentador; Estação 2: Separador; Estação 3: Separação e Processamento; e Estação 4: Estocagem).**

A primeira estação (Estação 1) denominada Alimentador é responsável pelo fornecimento de insumos as demais estações. É composta por um sistema de movimentação e um alimentador de peças. O sistema de movimentação possui dois atuadores lineares associados que permitem o deslocamento tanto horizontal em direção a próxima estação, atuador A1 (Eixo Y), quanto vertical, atuador A2 (Eixo Z), com o auxílio de uma ventosa. O alimentador possui um atuador linear que desloca a cada ciclo uma das diversas peças armazenadas para que seja levada pelo sistema de movimentação para a próxima estação. A Figura 5 apresenta um desenho esquemático da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída.

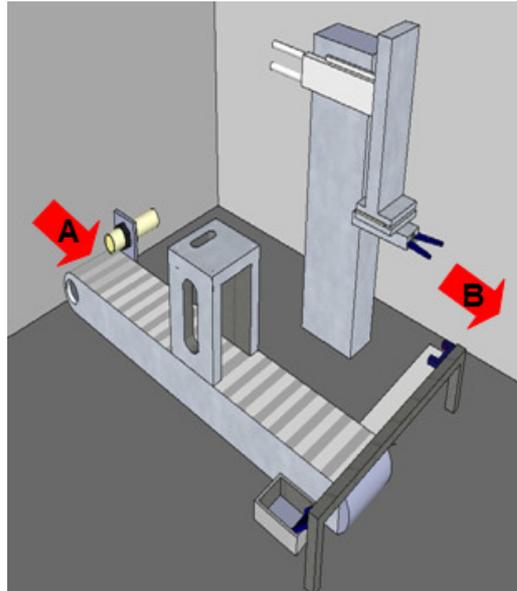
Cinco tipos de peças com características distintas podem ser fornecidas às demais estações: (1) metálicas grandes furadas; (2) metálicas grandes; (3) plásticas grandes; (4) metálicas pequenas; e (5) plásticas pequenas. As peças do tipo 2, 4 e 5

são consideradas defeituosas e devem ser descartadas durante o processo. As peças do tipo 1 passam por uma operação de polimento na Estação 3 e são estocadas. A peça do tipo 3 é estocada sem sofrer nenhum processamento. A Figura 6 apresenta os diferentes tipos de peças existentes.



**Figura 6: Peças utilizadas no processo (1: metálica grande furada, 2: metálica grande, 3: plástica grande, 4: metálica pequena e 5: plástica pequena).**

A Estação 2, denominada Separador, é responsável pelo descarte de peças fora das especificações desejadas quanto ao tamanho (peças metálicas pequenas e peças plásticas pequenas). É composto por uma esteira transportadora, um sistema linear de deslocamento de peças e um sistema movimentação. O sistema linear de deslocamento de peças é constituído pelo atuador linear A1 (Eixo X) associado a uma guia. Já o sistema de movimentação é composto por dois atuadores lineares integrados e uma garra. O atuador A2 (Eixo Z) é responsável pelo movimento vertical da garra, enquanto o atuador A3 (Eixo Y) é responsável pelo horizontal em direção à próxima estação. A Figura 7 apresenta um desenho esquemático da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída. As peças são depositadas pela Estação 1 na esteira, esta esteira possui um sensor óptico por barreira instalado a uma altura maior que as peças consideradas defeituosas. Caso a peça que está sendo deslocada pela esteira não interrompa o feixe de luz do sensor, significa que esta peça está fora das especificações. Então, ao chegar ao sistema de deslocamento é enviada em direção ao silo para que seja descartada. Caso a peça acione o sensor óptico significa que possui tamanho dentro das especificações e ao chegar ao deslocador é enviada para o sistema de movimentação para que seja enviada para Estação 3.



**Figura 7: Desenho esquemático Estação 2.**

A Estação 3, denominada Processamento e Separação, pode executar três operações distintas: polimento das peças metálicas furadas; deslocamento das peças plásticas; e descarte das peças metálicas sem furo. A estação é composta por uma mesa rotativa, um atuador de aferição de furo, uma retífica de polimento e um sistema de movimentação. O sistema de movimentação é construído por dois atuadores e uma garra. O atuador A1 (eixo Y) é responsável pelo movimento horizontal enquanto o atuador A2 (Eixo Z) é responsável pelo movimento vertical. A Figura 14 apresenta um desenho esquemático da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída.

As peças enviadas pela Estação 2 são depositadas na mesa rotativa e deslocadas até o atuador de aferição de furo. Se a peça a ser aferida for furada, o atuador avança até atingir o fim de curso acionando o sensor. Neste caso, a peça é deslocada até a retífica para que sofra um processo de polimento e então seja deslocada para a posição de envio para Estação 4.

As peças não furadas são diferenciadas quanto ao material com auxílio de um sensor indutivo existente na mesa. Se o sensor é acionado significa que a peça é metálica, considerada defeituosa, então, ela é deslocada até o sistema de movimentação para que seja descartada. As peças plásticas são diretamente encaminhadas para a posição de envio para a próxima estação.

A Estação 4, denominada Estocagem, é responsável pelo armazenamento das peças. A estação é composta por um sistema de movimentação de peças e um

sistema de pesagem. O sistema de movimentação é constituído por três atuadores integrados e uma garra. O atuador linear A1 (eixo X) é responsável pelo movimento horizontal, o atuador rotativo A2 (eixo Y) é responsável pelo avanço em direção à estação anterior e o atuador linear A3 (eixo Z) responsável pelo movimento vertical. O sistema de pesagem é constituído por um sensor de peso (Strain Gage) que possibilita que as peças sejam identificadas pela diferença de peso. A Figura 15 apresenta uma visão esquemática da referida estação, a seta A representa a entrada de peças na estação enquanto a seta B a saída.

## 5. PROJETO DE INCLUSÃO DA NOVA ESTAÇÃO

Para analisar os gargalos e o comportamento da nova estação da planta de processo, antes de seu desenvolvimento elaborou-se um modelo de simulação para análise. Este foi construído segundo a metodologia proposta por Banks *et al* (2009) através dos passos: formulação e análise do problema; planejamento do projeto; modelo conceitual; tradução do modelo conceitual; verificação e validação; experimentação; documentação e apresentação dos resultados e testes.

O modelo conceitual para a realização de simulações computacionais foi traduzido para o software Ururau. Utilizou-se, além disso, a metodologia proposta por Sargent (2011) para a verificação e a validação do modelo. Vale ressaltar que o modelo computacional foi construído segundo após o modelo conceitual está pronto, totalmente verificados e validados.

Para execução dos experimentos de análise, devido à simplicidade do sistema, foram utilizados predominantemente blocos básicos de modelo de simulação como o process. Já o modelo de emulação não utilizou o módulo process, tradicionalmente empregado para representação de ações em modelos de simulação. Para representar o acionamento dos sensores foi utilizado o módulo assign, enquanto a leitura dos valores de saída do controle foi realizada utilizando o módulo hold. Já o tempo entre os acionamentos foi representado utilizando o módulo delay. Além disto, enquanto o modelo para análise possibilita a execução de forma acelerada no tempo, ou seja, executar os experimentos de forma acelerada, o modelos de emulação precisou ser executado em tempo real.

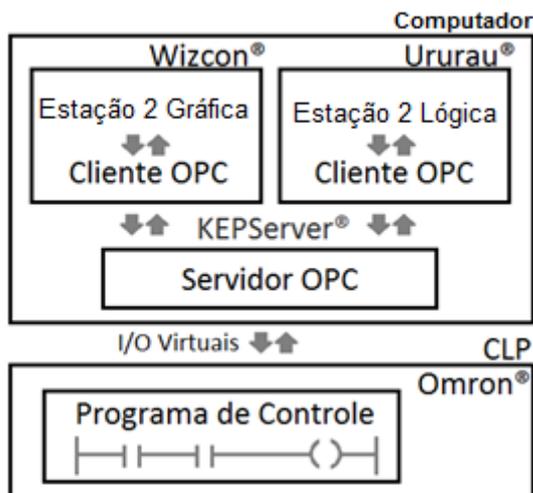
## 6. AMBIENTE DE TESTES PROPOSTO

### 6.1. Modelo de simulação para análise

Os testes foram realizados em três etapas. Na primeira, integrou-se o modelo de simulação desenvolvido ao sistema de controle para realização de testes, tanto do modelo quanto do sistema de controle, chamado comissionamento virtual. Esta etapa além possibilitar avaliar erros existentes no funcionamento individual da estação possibilita validar o modelo desenvolvido. Na segunda etapa, integrou-se o modelo e o sistema de controle a planta de processo e realizou-se o comissionamento híbrido. Assim, além do funcionamento individual da estação é possível detectar falhas na interação da estação em questão com o restante do processo. Por fim, integrou-se a estação à planta de processo realizando os últimos testes do sistema, realizando o comissionamento tradicional.

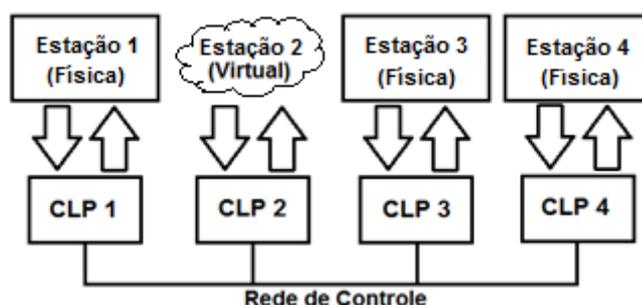
Diante do problema detalhado na seção anterior, utilizou-se inicialmente o comissionamento virtual para auxiliar o desenvolvimento e teste dos sistemas de controle e supervisão da nova estação. Neste método, o controlador real é conectado a planta virtual como descrito na. Esta abordagem possibilita a realização dos chamados testes individuais da estação. A execução destes teste é detalhada na sessão seguinte.

A Figura 8 apresenta de forma esquemática o mecanismo de integração do sistema proposto. A parte superior representa o sistema simulado que esta implemento em um computador. A parte inferior o programa de controle implementado em um CLP. Durante esta etapa um modelo lógico da Estação 2 (modelo de simulação a eventos discretos no software Ururau) integrado a um modelo virtual da referida estação (sistema de supervisão no software Wizcon). É integrado a sistema de controle (CLP do fabricante OMRON) através de um servidor de comunicação OPC (KEPServer), permitindo que testes sejam realizados durante o desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão. Este sistema é detalhado na Figura 8.



**Figura 8: Esquema da integração do modelo de simulação (lógica) e do supervisório (gráfica) da Estação 2 ao sistema de controle para o comissionamento virtual.**

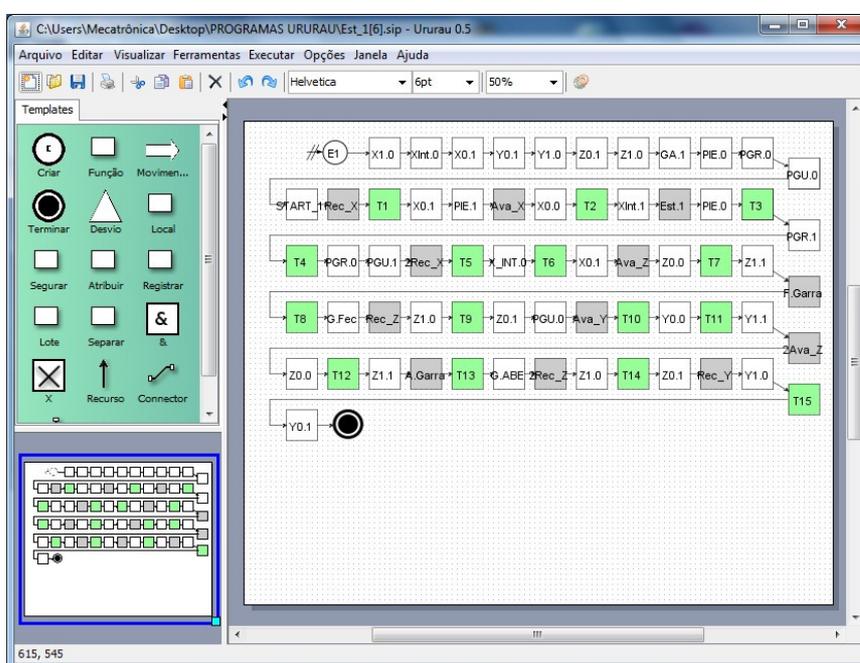
Após o desenvolvimento do sistema de controle e testes individuais utilizando o comissionamento virtual, realizou-se o comissionamento híbrido. Nesta abordagem, parte do sistema real que não apresenta risco de se realizar testes é integrada ao modelo de emulação. No caso específico do sistema utilizado, o modelo desenvolvido foi integrado através de um servidor de comunicação OPC ao CLP da respectiva estação. Uma rede de comunicação entre os CLP's (Rede de Controle) possibilitou a interação com as demais estações de forma virtual, não apresentando risco para a execução dos testes. O sistema é detalhado na Figura 9 .



**Figura 9: Esquema da integração da Estação 2 às demais estações para realização do comissionamento híbrido.**

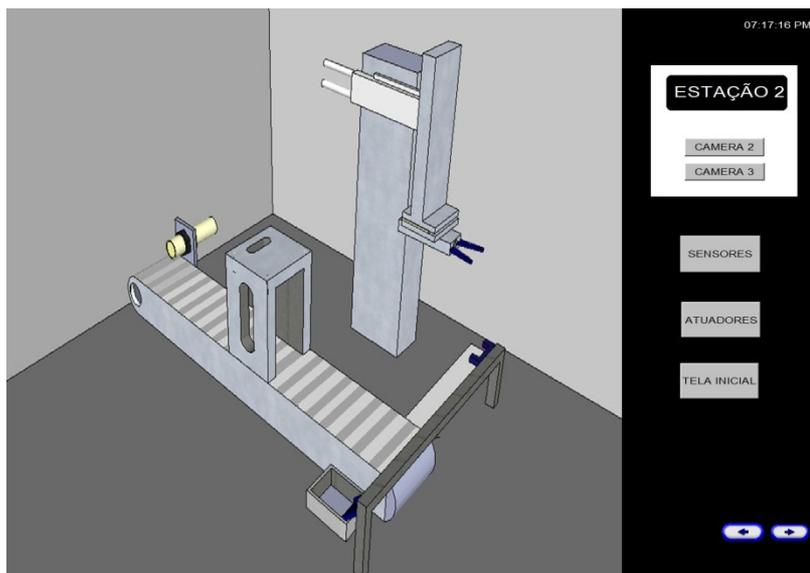
## 6.2. Construção do sistema de testes

O desenvolvimento do sistema foi iniciado com a construção do modelo conceitual. Este foi desenvolvido na linguagem IDEF-SIM, proposta por Montevechi *et al* (2010). Após construção, verificação e validação do modelo conceitual este foi traduzido para o software Ururau para a construção do modelo de emulação. A Figura 10 apresenta uma imagem da tela do software Ururau após a tradução do modelo conceitual. Nota-se uma grande semelhança entre o modelo computacional e o conceitual, isso se dá pelo fato de o software Ururau ter desenvolvimento do modelo baseado em IDEF-Sim assim como o modelo conceitual.



**Figura 10: Modelo de simulação em Ururau.**

O modelo virtual foi desenvolvido utilizando o próprio sistema de supervisão utilizando o software de supervisão Wizcon. Já para construção das imagens foi utilizado o software Google SketchUp. Integrou-se, então, os 2 sistemas de controle e de supervisão utilizando um servidor de comunicação OPC, como descrito anteriormente. A Figura 11 apresenta uma imagem da tela de supervisão da Estação 2, que serviu como modelo gráfico para o ambiente construído.



**Figura 11: Tela de supervisão Estação 2.**

## 7. EXECUÇÃO DOS TESTES

Para testar o ambiente híbrido desenvolvido, composto pelo modelo de simulação e pelo sistema de controle, foram inseridos no sistema três erros de lógica, tipicamente encontrados em plantas industriais, como apresentado no Quadro 1. O primeiro erro foi inserido na Estação 1. O segundo foi provocado na interação entre as estações 1 e 2. Já o terceiro, de forma semelhante ao segundo, foi inserido na interação entre as estações 2 e 3.

**Quadro 1: Erros inseridos no programa de controle**

	Estação 1	Estação 2	Estação 3	Estação 4
Erro 1	-	Individual (2)	-	-
Erro 2	Interação (1-2)		-	-
Erro 3	-	Interação (2-3)		-

Para a comunicação entre as estações, utilizou-se o sistema de comunicação que normalmente é utilizado em sistemas industriais, ou seja, um sinal lógico operado entre controladores. Assim, no caso dos testes realizados, foi gerado um

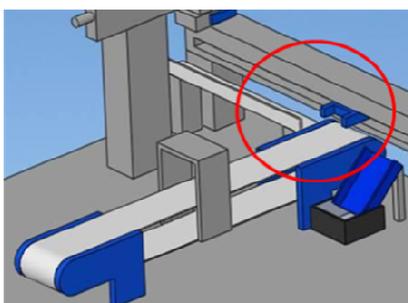
sinal vindo da Estação 1 para o modelo de simulação. O referido sinal, então, inicia a operação da Estação 2, virtualmente. Com isso, pôde-se analisar a interação da Estação 1 e Estação 2.

A utilização do modelo de simulação integrado ao sistema de controle permitiu avaliar uma situação típica e indesejada que pode ocorrer em sistemas automatizados, devido à interferência provocada pela simultaneidade de movimentos entre estações. No caso específico do ambiente proposto, esta interferência ocorreu apenas virtualmente. Com isso, pôde-se testar as operações sem que houvesse o contato físico e, conseqüentemente, o risco de danos aos equipamentos.

#### TESTES PRELIMINARES (COMISSIONAMENTO VIRTUAL)

Durante os testes preliminares, não se utilizou todo o sistema para realização dos testes. Foi utilizada apenas a estação simulada integrada ao sistema de controle, realizando, assim, o comissionamento *hardware in the loop*. Porém, este tipo de teste não considera a interação entre as estações, parte que oferece os riscos mais potenciais ao sistema.

Dos 3 (três) erros inseridos na lógica 1 (um), deles foi detectado, durante a realização do comissionamento *hardware in the loop*, um erro individual da Estação 1. Este erro gerava o inesperado acionamento da guia deslocadora de peças enquanto a esteira ainda era mantida em movimento, como ilustra a Figura 12. Este erro poderia danificar tanto o mecanismo da esteira, quanto o da guia. Como esperado, este teste detectou apenas erros locais, comprovando a limitação do *hardware in the loop* convencional quanto a erros na interface.

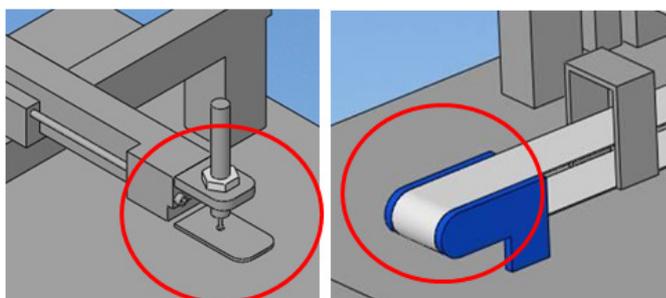


**Figura 12: Erro individual Estação 1.**

## TESTE UTILIZANDO O COMMISSIONAMENTO HÍBRIDO

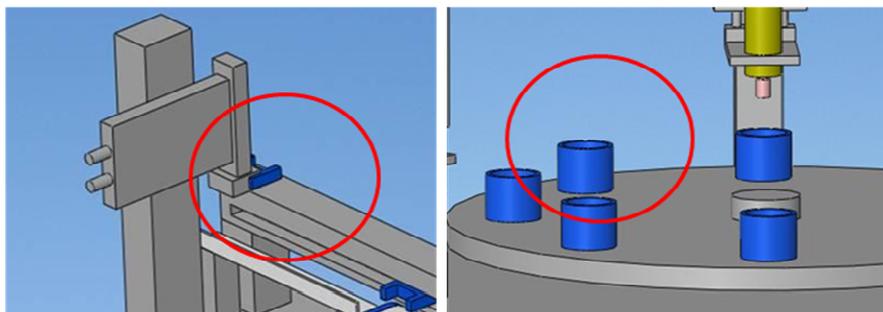
No comissionamento híbrido, o modelo foi integrado às estações reais, para realização dos testes, possibilitando a análise da interação entre as estações. Durante esse teste, ao fim da operação da Estação 1, a mesma gerou um sinal para a Estação 2, permitindo o início da operação, porém, sem interação física, evitando o risco de danos devido a falhas na transição. Como a Estação 2 estava sem suprimento de energia, mesmo se houvesse um erro na lógica e a inesperada simultaneidade de movimentos dos atuadores, não representaria risco aos equipamentos.

Nesta etapa, foram detectados 2 (dois) erros de lógica. No primeiro deles, a esteira da Estação 2 era acionada enquanto a Estação 1 realizava o movimento para depositar a peça na referida esteira. Este erro causaria danos tanto ao mecanismo da esteira, quanto ao do atuador responsável por depositar as peças. A Figura 13 ilustra o erro detectado. Como no momento dos testes a Estação 2 era mantida sem suprimento de energia, o erro não gerou danos ao equipamento.



**Figura 13: Erro interação Estações 1 e 2.**

O outro erro foi detectado durante a interação entre as estações 2 e 3. Neste, a mesa rotativa da Estação 3 era acionada enquanto a Estação 2 depositava a peça, como ilustra a Figura.14 Tal falha poderia causar sérios danos ao mecanismo de ambas as estações, caso não fosse detectada durante a etapa de comissionamento.



**Figura 14: Erro interação Estações 2 e 3.**

Após o comissionamento híbrido da planta, testes físicos foram realizados para aferir se a lógica de controle desenvolvida, utilizando o processo simulado, controlaria a planta física. Neste teste, todas as estações foram utilizadas. Durante estes testes, o suprimento de energia de todas as estações era mantido, representado a etapa denominada de operação assistida. A planta se comportou como esperado, comprovando a eficiência do comissionamento híbrido.

## 8. AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS TESTES

Os testes realizados utilizando o comissionamento virtual e posteriormente o comissionamento híbrido possibilitaram a detecção dos erros inseridos no programa de controle. Os testes foram iniciados com a execução do comissionamento virtual, visando a detecção de falhas individuais da estação. Como esperado, o comissionamento virtual detectou apenas a falha individual da Estação 2, comprovando que esta abordagem não possibilita a detecção de falhas na interação com as demais estações, conforme descrito no Quadro 2 .

**Quadro 2: Erros detectados x teste realizado**

Teste\Erro	Erro Individual Estação 2	Erro Interação Estações 1 e 2	Erro Interação Estações 2 e 3
Comissionamento Virtual	detectado	não detectado	não detectado

Comissionamento Híbrido	-	detectado	detectado
----------------------------	---	-----------	-----------

O comissionamento híbrido possibilitou a análise da interação entre as estações, desta forma, como esperado, os outros dois erros inseridos foram detectados com esta abordagem. O primeiro deles na interação entre as estações 1 e 2 e o outro na interação entre as estações 2 e 3.

## 9. CONCLUSÕES

O ambiente híbrido construído utilizando modelos de simulação a eventos discretos e estações de manufatura, possibilitou o desenvolvimento e a realização de testes dos sistemas de controle e supervisão. Com o auxílio do referido ambiente, desenvolveu-se de forma integrada o sistema de controle e o sistema de supervisão.

Foi possível realizar testes destes durante o desenvolvimento permitindo que sua construção fosse menos empírica, e com uma menor propensão a erros. Após o desenvolvimento dos sistemas de controle e supervisão iniciou-se a etapa de testes, denominada comissionamento. O primeiro teste realizado foi o comissionamento virtual da Estação 2. Este possibilitou analisar o comportamento dos sistemas de controle e supervisão da referida estação de forma individual. Erros puderam ser detectados e corrigidos sem o uso da estação física. Porém, este teste não possibilita analisar a interface entre a estação analisada e as demais. Para isso, realizou-se o comissionamento híbrido, que permitiu que testes integrados da interação da nova estação com a planta de processo fossem realizados de forma menos arriscada.

Desta forma, pode-se dizer que o ambiente híbrido de testes proposto, possibilita que o sistema de controle e supervisão seja desenvolvido de maneira mais segura. E que testes deste sistema sejam realizados de forma mais estruturada, gerando uma redução no tempo de execução das modificações e no custo envolvido. Por outro lado, uma alternativa que se apresentou durante a realização do presente trabalho foi a perspectiva de ser utilizar o mecanismo híbrido de teste como uma ampliação das possibilidades de sistemas a serem utilizados no ensino de sistemas de controle.

## REFERÊNCIAS

- CARDOSO, L. D., BASTOS, P. J. T. E RANGEL, J. J. A. Discrete event simulation for integrated design in the production and commissioning in manufacturing systems, DC – USA, 2013, **Proceedings** ..., p. 1-10. (Aprovado)
- DIOGO, R. A.; SANTOS, E. A. P.; VIEIRA, A. D.; LOURES, E. F. R.; BUSETTI, M. A. A computational control implementation environment for automated manufacturing systems, **International Journal of Production Research**, United Kingdom, Vol. 50, N. 22, 6272–6287, 2012.
- ERICKSON, C. Simulation, animation, and shop-floor control. In: Winter Simulation Conference, Atlanta, GA – USA, 1987, **Proceedings** ..., p. 649-653.
- HARRISON, W. S.; TILBURY, D. Virtual fusion: hybrid process simulation and emulation-in-the-loop, 9TH Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Haifa – Israel, 2008, **Proceedings** ..., p. 1-8.
- HIBINO H.; FUKUDA, Y.; YURA, Y.; MITSUYUKI, K.; KANEDA, K. Manufacturing Adapter of Distributed Simulation Systems Using HLA, CA – USA, 2002, **Proceedings** ..., p. 1099-1107.
- HITCHENS, M. W.; RYAN, T. K. Direct connect emulation and the project life cycle, In: Winter Simulation Conference, Washington, DC – USA, 1989, **Proceedings** ..., p. 843-847.
- KO, M., PARK, S. C., CHOI, J.; CHANG, M. New modelling formalism for control programs of flexible manufacturing systems, **International Journal of Production Research**, United Kingdom, Vol. 51, N. 6, pp. 1668-1679, 2013.
- OKOLNISHNIKOV, V. Development of process control systems with the use of emulation models, **International Journal of Mathematics and Computers in Simulation**, Vol. 5, N. 6, 553-560, 2011.
- SMITH, J.S.; CHO, Y. Offline commissioning of a PLC-based control system using Arena. Winter Simulation Conference, Miami, FL – USA, 2008, **Proceedings** ..., p. 1802-1810.

