

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO**

**DENISE YUMI AKAI**

**MODELAGEM DE UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL ATRAVÉS  
DE REDE DE PETRI**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2017**

**DENISE YUMI AKAI**

**MODELAGEM DE UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL ATRAVÉS  
DE REDE DE PETRI**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso Superior de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Endo

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2017**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Cornélio Procópio  
Departamento Acadêmico de Elétrica  
Curso de Engenharia de Controle e Automação**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Denise Yumi Akai**

### **Modelagem de uma planta didática industrial através de Redes de Petri**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 18:00hs do dia 13/06/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Marcos Banheti Rabello Vallim - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - (Membro)

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Minha eterna gratidão a Deus, Pai, Querido e Amado, por tudo, por sempre e para sempre.

Obrigada mãe Adelina pelos ensinamentos e amor incondicional. E obrigada Renato, por ser mais que meu padrasto, ser meu pai. Responsáveis por todo suporte para realizar meus sonhos.

Ao meu irmão Caio, e ao meu irmão Igor, pelos conselhos e cumplicidade.

Aos meus avós, por serem exemplos de dedicação pela família.

Agradeço o meu companheiro Rafael, por estar sempre ao meu lado, pela confiança, paciência, apoio e por todo amor.

Aos meus sogros Milton e Delourdes, por serem meus segundos pais.

Ao meu cunhado Vinicius e cunhada Mariana, por toda ajuda.

À família Utiamada e Koguishi pelo aconchego de família, sendo sempre parentes presentes.

Ao meu professor Wagner Endo pela orientação, ensinamento, auxílio e sinceridade fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos, Daniel, Erik e Matheus que foram minha família durante a graduação. Lucas, com quem sempre eu pude contar. Gabriel, pela parceria de projetos. Ao Fidelis por toda ajuda para o desenvolvimento do trabalho. E aos demais colegas pelos estudos compartilhados, momentos de alegria e de descontração.

Aos professores e funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelo conhecimento, estrutura, suporte e total apoio para que eu não desistisse nos momentos difíceis, dentre estes a surpresa da gravidez.

E por falar em gravidez, o meu maior agradecimento é ao meu filho, Matheus. Agradeço por ser minha luz, minha razão e o meu maior amor. Por você, sinto que sou capaz de tudo. Para você, eu sei que sou capaz de tudo. Fonte de forças, me fez nunca desistir de nada, pois você merece tudo. Obrigada.

## RESUMO

AKAI, Denise Yumi. **Modelagem de uma planta didática industrial através de Rede de Petri**. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017

O presente trabalho compõe-se de um estudo das tomadas de decisões da planta didática industrial SMAR para a modelagem em Rede de Petri com representações gráficas da estrutura de sistemas a eventos discretos. A planta didática SMAR, possui processos de controle e supervisão fiel à realidade da Automação Industrial, sendo estas características e situações encontradas no mercado. Mercado que, cada vez mais, recorrem a sistemas autômatos, pela redução de custo e aumento da produtividade. Como o sistema da planta didática industrial é contínuo (controle contínuo e processos) e o intuito do trabalho é a modelagem, o modelo passa a ser uma abstração do sistema original sendo descrito por meio de representações gráficas e princípios físicos que governam o sistema. Para transformar valores contínuos em valores discretos utilizou-se uma lógica de comparação. Por meio de uma estrutura lógica (grafo direcionado com comentários) simulando o comportamento, pode-se utilizar o formalismo matemático gerado da modelagem para análises de dados e ter segurança do seu funcionamento. A abordagem sequencial da Rede de Petri é muito aplicada em processos de produção por batelada e é importante para evitar conflitos, situações inesperadas e analisar acessibilidades.

**Palavras-chave:** Planta didática industrial. Modelagem em Rede de Petri. Sistema a eventos discretos. Automação Industrial. Formalismo matemático.

## ABSTRACT

AKAI, Denise Yumi. **Modeling of an industrial didactic plant through Petri Net.** 60f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The present work consists of a study of the decision-making of the industrial didactic plant SMAR for the modeling in Petri Net representing graphically the structure for systems to discrete events. The SMAR didactic plant has processes of control and supervision faithful to the reality of Industrial Automation, being these characteristics and situations found in the market. A market that increasingly uses automated systems, by reducing costs and increasing productivity. As the system of the industrial didactic plant is continuous (continuous control and processes) and the purpose of the work is the modeling, the model becomes an abstraction of the original system being described through graphical representations and physical principles that govern the system. In order to transform continuous values into discrete values, a comparison logic was used. By means of a logical structure (feedback graph) simulating the behavior, one can use the generated mathematical formalism of the modeling for data analysis and be sure of its operation. The sequential approach of Petri Net is very applied in batch production processes and is important to avoid conflicts, unexpected situations and analyze accessibility.

**Keywords:** Industrial didactic plant. Modeling in Petri Net. Discrete event system. Industrial automation. Mathematical formalism.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Exemplo de Rede de Petri e sua simulação.....	23
FIGURA 2 – Planta didática industrial SMAR.....	28
FIGURA 3 – Sinótico das malhas de controle da planta didática.....	31
FIGURA 4 – Bombas da planta didática. ....	31
FIGURA 5 – Transmissor e válvula de controle de vazão da planta didática.....	32
FIGURA 6 – Modelagem inicial do processo de antes de ligar a planta.....	43
FIGURA 7 – Modelagem inicial do processo de preparar os tanques antes das operações.....	44
FIGURA 8 – Modelagem inicial do processo de aquecimento e do processo de mistura.....	45
FIGURA 9 – Simulação do processo de antes de ligar a planta.....	46
FIGURA 10 – Simulação do processo de preparar os tanques antes das operações.....	47
FIGURA 11 – Simulação do processo de aquecimento e mistura.....	48
FIGURA 12 – Análise de alcançabilidade do processo de antes de ligar a planta.....	49
FIGURA 13 – Análise de alcançabilidade do processo de preparar os tanques antes das operações.....	50
FIGURA 14 – Análise de alcançabilidade do processo de aquecimento e mistura.....	50
FIGURA 15 – Invariantes de lugar do processo de antes de ligar a planta.....	51
FIGURA 16 – Invariantes de lugar do processo de preparar os tanques antes das operações.....	52
FIGURA 17 – Invariantes de lugar do processo de aquecimento e mistura.....	53
FIGURA 18 – Invariantes de transição do processo de antes de ligar a planta.....	54
FIGURA 19 – Invariantes de transição do processo de preparar os tanques antes das operações.....	55
FIGURA 20 – Invariantes de transição do processo de aquecimento e mistura.....	56



## LISTA DE SIGLAS

SED	Sistemas a Eventos Discretos
DES	<i>Discrete Event Systems</i>
OPC	<i>OLE for Process Control</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
TINA	<i>Time Petri Net Analyzer</i>
CVCS	<i>Continuous Variable Dynamic Systems</i>
DEDS	<i>Discrete Event Dynamic Systems</i>

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 PROBLEMA .....	14
1.2 JUSTIFICATIVA .....	15
1.3 OBJETIVOS .....	15
1.3.1 Objetivo geral .....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.2 ESTRUTURA .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS .....	17
2.1.1 Propriedades e características dos sistemas a eventos discretos .....	17
2.1.2 Níveis de abstração no estudo do sistema a eventos discretos .....	18
2.1.3 Formalismo de modelagem discreta .....	19
2.2 REDE DE PETRI .....	20
2.2.1 Princípios básicos da Rede de Petri.....	20
2.2.2 Notações e definições da Rede de Petri .....	21
2.2.3 Fichas e transição de estado.....	22
2.2.4 Dinâmica da Rede de Petri.....	22
2.2.5 Análise de alcançabilidade .....	23
2.2.5.1 Vivacidade .....	24
2.2.5.2 Limitação .....	24
2.2.5.3 Reversibilidade .....	24
2.2.6 Análise estrutural .....	24
2.2.6.1 Invariantes de lugar .....	25
2.2.6.2 Invariantes de transição .....	25
2.2.7 Matriz incidência.....	25
2.2.8 Equação fundamental .....	26
<b>3 ABORDAGEM DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS NO ESTUDO DA PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA</b> .....	28
3.1 PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL - GENERALIDADES .....	28

3.2	INFRAESTRUTURA BÁSICA.....	29
3.3	OPERAÇÕES DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL.....	29
3.3.1	Bombas hidráulicas .....	31
3.3.2	Válvulas de controle, rotômetros e transmissores .....	32
3.4	INFORMAÇÕES PARA A MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS DA PLANTA.....	32
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DA MODELAGEM DO SISTEMA DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL.....</b>	<b>35</b>
4.1	DEFINIÇÃO DOS PROCESSOS SEQUENCIAIS .....	35
4.2	TOMADAS DE DECISÕES .....	35
4.2.1	Processo antes de ligar a planta didática .....	36
4.2.2	Processo para preparar os tanques antes das operações de controle .....	37
4.2.3	Processo de aquecimento .....	40
4.2.4	Processo de mistura.....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>43</b>
5.1	MODELAGEM DOS PROCESSOS ATRAVES DE REDE DE PETRI.....	43
5.2	ANÁLISE DA REDE DE PETRI.....	46
5.2.1	Simulação da evolução da Rede de Petri.....	46
5.2.2	Análise de alcançabilidade .....	49
5.2.3	Análise estrutural.....	51
5.2.3.1	Invariantes de lugar .....	51
5.2.3.2	Invariantes de transição .....	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No contexto atual de globalização, a industrialização tornou-se um fator determinante da economia, uma vez que novas técnicas marcaram o avanço dos processos de produção e produtividade. Acompanhada pelo desenvolvimento tecnológico, Bertulucci (2012) destaca que a integração de sistemas e subsistemas em uma indústria, impacta diretamente na sua forma de produção. Com um mercado mundial mais competitivo e abrangente, integrar, informatizar e automatizar processos industriais são peças-chaves para se manter no mercado, pois além de aumentar a produtividade, proporcionam menor custo de produção, diferenciação dos produtos e serviços, confiabilidade e funcionalidade. A automação industrial “tornou-se o maior poder gerador de riquezas que jamais existiu” (SILVEIRA; SANTOS, 2008).

O aumento da complexidade dos sistemas automatizados nos leva a estudar a maneira com que estes sistemas agem com a ocorrência de eventos e a mudança de estado em relação a este evento, pois para tratar de problemas relacionados ao controle torna-se altamente desejável. Sistemas com estas características são denominados sistemas a eventos discretos (CURY, 2001).

Os Sistemas a Eventos Discretos - SED (do inglês: *Discrete Event Systems - DES*) são sistemas de estados discretos e dirigido a eventos, isto é, a evolução de seus estados depende totalmente da ocorrência de eventos assíncronos sobre o tempo (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Sendo aqueles em que as mudanças de estados se dão pela ocorrência de eventos instantâneos como, por exemplo, o início ou o final de uma operação da máquina. Assim como os eventos, os estados de tais sistemas também são definidos por variáveis discretas (MARÇAL; CARMO; OLIVEIRA, 2011).

Sistemas compostos por subsistemas cujo o funcionamento conjunto deve obedecer uma série de restrições de coordenação, a especificação de controle visa justamente a coordenar o funcionamento do SED de modo a assegurar o respeito a tais restrições (RIBEIRO; LEPIKSON; LIMA II, 2010).

Contudo, surgiram linguagens e formalismos matemáticos que permitem modelar sistemas a eventos discretos, como as Redes de Petri (PLÍNIO, 2001). O modelo de Rede de Petri foi proposto por Carl Adam Petri para modelar a

comunicação entre autômatos (CARDOSO; VALETTE, 1997). As Redes de Petri, embora permitam abordagem lógica combinacional, a mesma possui maior ênfase na abordagem sequencial (MARÇAL; CARMO; OLIVEIRA, 2011), importante para evitar conflitos e situações inesperadas.

A utilização da Rede de Petri na modelagem de sistemas a eventos discretos segundo Cardoso e Valette (1997) possui as seguintes vantagens: a possibilidade de descrever uma ordem parcial entre vários eventos, ressaltando assim a sua flexibilidade; os estados, bem como os eventos, são representados visualmente; uma única família de ferramentas é utilizada através de especificações pela modelagem, análise da avaliação do desempenho pela implementação e principalmente uma descrição precisa e formal das sincronizações torna-se possível, o que é essencial para atingir a necessária segurança do funcionamento de todo o processo, analisando a acessibilidade dos estados.

A oportunidade de estudo dessa ferramenta de modelagem em processos industriais aplicáveis, com equipamentos utilizados na automação industrial visando o funcionamento conforme determinado, prepara e agrega experiência ao desenvolvedor da modelagem. Essa oportunidade passa a existir com a aplicação de um sistema físico real, porém em escala reduzida no estudo de plantas didáticas industriais.

A planta didática industrial representa a operação de diversas malhas de controle que podem ser implementadas em uma planta em campo, utilizando os mesmos recursos, instrumentos disponíveis no mercado e *softwares* para configuração e operação. Na planta, são possíveis o desenvolvimento do estudo e a aplicação de processos reais de controle industriais (SMAR, 2012).

Para o desenvolvimento do trabalho, utilizou-se a planta didática industrial, disponível no laboratório de instrumentação e processamento de sinais da Universidade Tecnológica Federal de Paraná (sala G103), campus Cornélio Procopio.

A planta é composta por dois tanques de processos industriais, um sendo o tanque de aquecimento e outro um tanque de mistura de líquidos (SILVA, 2011b). Ela é operada e controlada através de uma estação de trabalho constituída de microcomputador, cujo o sistema de controle utiliza a tecnologia *PROFIBUS* e o *software* de operação e supervisão que efetua a aquisição de dados dos sensores e os apresenta por meio da telas e fluxogramas de processos (SMAR, 2012). Através

destes *softwares*, permite-se atuar nos registros de informações modificando valores e nos modos operacionais das malhas de controle (SILVA, 2011b).

Como os processos da planta didática industrial são contínuos e o intuito do trabalho é desenvolver a modelagem em Redes de Petri baseado em sistema discreto, o modelo passa a ser uma abstração do sistema original. Essa abstração torna-se possível por meio de representações gráficas da modelagem em grafos direcionados e princípios físicos que governam o sistema através de tarefas determinadas em projetos de controle operacional. Para transformar valores contínuos em valores discretos utilizou-se uma lógica de comparação por tomadas de decisões. Por meio de uma estrutura lógica (grafo direcionado com comentários) simulando o comportamento, pôde-se utilizar o formalismo matemático gerado da modelagem para análises de informações e ter segurança do seu funcionamento conforme os eventos e estados do sistema.

Desta forma, este trabalho propõe apresentar a modelagem em sistemas a eventos discretos utilizando o modelo de Redes de Petri da planta industrial didática. Por meio do estudo das tomadas de decisões por tarefas da planta (resposta aos estímulos) e lógica sequencial, para a implementação da modelagem, buscou-se utilizar a ferramenta TINA (*Time Petri Net Analyzer*) que simula a evolução da rede e retorna a análise de alcançabilidade e a análise estrutural da modelagem, essencial para validação do modelo. A partir da representação visual da planta relaciona-se as condições dos processos pela abstração no nível de sequenciamento do comportamento lógico, resultando em uma modelagem operacional da planta didática industrial.

## 1.1 PROBLEMA

Devido estudos diversos realizados na planta industrial didática, a necessidade de uma representação das atividades concorrentes e assíncronas dos processos, aumentou cada vez mais, devido à falta de tratamento de sistemas a eventos discretos em uma ferramenta de simulação e uma semântica formal. O problema, então, é a inexistência de uma representação efetiva da técnica de descrição e especificação dos processos da planta.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As Redes de Petri permitem a modelagem e análise de sistemas complexos. São um formalismo operacional que descreve como o sistema trabalha, gerando uma visão sequenciada.

Podem ser descritas como um conjunto de equações algébricas, verificando o formalismo de relações de precedência entre eventos e condições. Permitem uma clara distinção entre habilitação de tarefas e a sua execução.

Desenvolver a modelagem em uma ferramenta que além de gerar análises dos processos e do modelo, permite a simulação do sistema, possibilita inferências sobre os modelos sem a necessidade de construir novos ou adicionais, sem a necessidade de perturbá-los, quando o custo operacional é alto ou inviável de realizar experimentos e permitem definir limites do sistema em questão.

## 1.3 OBJETIVOS

Apresenta-se o objetivo geral e objetivos específicos do trabalho.

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver a modelagem dos processos da planta didática industrial utilizando o modelo de Redes de Petri em uma ferramenta para a modelagem e gerar análise de alcançabilidade e análise estrutural, essenciais para validar a modelo e garantir operacionalidade.

### 1.3.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Analisar todas as tomadas de decisões da planta didática (abstração dos processos contínuos em processos discretos);

- Modelar os processos da planta com Rede de Petri (ferramenta TINA);
- Analisar a alcançabilidade da modelagem;
- Analisar a estrutura da modelagem; e
- Validar o modelo desenvolvido.

## 1.2 ESTRUTURA

O trabalho de conclusão de curso estrutura-se em 7 capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se a introdução com o tema, problema e justificativa, os objetivos a serem alcançados. No segundo capítulo, consta a fundamentação teórica, apresentando os conceitos teóricos de Sistemas a Eventos Discretos e Redes de Petri. No terceiro, consta a abordagem de sistemas a eventos discretos no estudo da planta, desde a infraestrutura básica, operações de controle e informações necessárias para a modelagem. No quarto é apresentado a metodologia do trabalho, com a definição dos processos sequencias e tomadas de decisões levantadas para a modelagem de cada processo. O quinto capítulo apresenta-se os resultados obtidos da modelagem e análises quanto a alcançabilidade da rede e quanto a estrutura, para validar o modelo desenvolvido. No sexto, a conclusão obtida. E por fim, no último capítulo são apresentadas todas as referências utilizadas.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo, apresenta-se conceitos abordados durante o desenvolvimento do trabalho, tais como, Sistemas a Eventos Discretos e Redes de Petri.

### 2.1 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Quando o estado de um sistema é descrito naturalmente por um conjunto discreto como  $\{0,1,2, \dots\}$ , e as transições de estado são observadas somente em tempos discretos no tempo, associa-se essas transições de estado com "eventos" e surgindo o conceito sobre um "sistema a eventos discretos" (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

#### 2.1.1 Propriedades e características dos sistemas a eventos discretos

Segundo Cassandras e Lafortune (2008), a maioria dos êxitos no sistema e na engenharia de controle se baseou em modelos em equações diferenciais. Pode-se dizer que se obteve um modelo de espaço de estados de um sistema quando podemos facilmente especificar o seguinte conjunto de equações:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (1)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t), t) \quad (2)$$

onde a equação (1) é um conjunto de equações de estado com condições iniciais especificadas, e a equação (2) é um conjunto de equações de saída.

Para usar esse modelo matematicamente conveniente, existem duas propriedades fundamentais que os sistemas devem satisfazer:

1. São sistemas de estado contínuo.
2. O mecanismo de transição de estado é impulsionado pelo tempo.

A primeira propriedade permite definir o estado por meio de variáveis contínuas, que podem assumir valores reais (ou complexos). É por essa razão

que nos referiremos a esta classe de sistemas como Sistemas Dinâmicos de Variação Contínua (CVDS - *Continuous-Variable Dynamic Systems*), quantidades físicas comuns, tais como a oscilação, a velocidade, a aceleração, a temperatura, a pressão e o fluxo. Uma vez que podemos definir naturalmente as derivadas para essas variáveis contínuas, podemos usar equações diferenciais como a equação (1).

A segunda propriedade refere-se ao fato de que o estado geralmente muda à medida que o tempo muda. Como resultado, a variável de tempo é uma variável naturalmente independente para modelar tal sistema.

Em contraste com o CVDS, os Sistemas Dinâmicos de Eventos Discretos (DEDS - *Discrete Event Dynamic Systems*) ou, mais amplamente, os Sistemas a Eventos Discretos (SED), satisfazem as duas propriedades seguintes:

1. O espaço de estados é um conjunto discreto.
2. O mecanismo de transição de estado é impulsionado por evento.

*Definição:* O Sistema a Eventos Discretos é um sistema de estado dinâmico, orientado a eventos, ou seja, a sua evolução de estado depende completamente da ocorrência de eventos discretos assíncronos (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

### 2.1.2 Níveis de abstração no estudo do sistema a eventos discretos

Os três níveis de abstração na qual os SED's são desenvolvidos e estudados são: sem tempo (ou lógico); cronometrado; e estocástico (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

As linguagens, que são conjuntos de eventos em um "alfabeto" que define sequências de eventos como "palavras", as linguagens cronometradas que são informações disponíveis fora do conjunto de caminhos de amostra do sistema - função de distribuição de probabilidade associada para os eventos e linguagens cronológicas temporárias (modelagem do sistema que lista todos possíveis caminhos - amostra juntamente com informações estatísticas relevantes) representam estes três níveis.

A escolha do nível apropriado de abstração depende claramente dos objetivos da análise. Em muitos casos, estamos interessados no "comportamento lógico" do sistema, isto é, assegurar que ocorre uma ordenação precisa dos eventos que satisfaça um dado conjunto de especificações. Ou podemos estar interessados em descobrir se um determinado estado (ou conjunto de estados) do sistema pode ser alcançado ou não.

Em seguida, podemos nos interessar no tempo dos eventos, a avaliação do desempenho de um SED medido através de quantidades, tais como, o rendimento ou tempo de resposta. Para isto, necessita-se considerar o modelo de linguagem cronometrada do sistema.

Por fim, não podemos ignorar o fato de que o SED funciona corretamente em um ambiente de trabalho, requer, portanto, o desenvolvimento de modelos probabilísticos e metodologias analíticas relacionadas e análise de desempenho. Nestes casos, a linguagem cronológica de modelagem do sistema também deve ser considerada.

Estes três níveis de abstração são complementares à medida que abordam diferentes questões de comportamento de um SED (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

### 2.1.3 Formalismo de modelagem discreta

Existem diversos formalismos de eventos discretos. Os formalismos diferem pela forma como representam a informação de estados, usando uma estrutura de transição, ou seja, especificando quais são os eventos possíveis em cada estado do sistema. Eles também são passíveis de várias operações de composição, o que permite construir o modelo de evento discreto de um sistema a partir de modelos de eventos discretos dos componentes do sistema. Isso torna as Rede de Petri convenientes para a construção de modelos. As questões de análise e síntese são, então, tipicamente adicionadas, fazendo uso das propriedades estruturais da estrutura de transição no modelo (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

## 2.2 REDE DE PETRI

Uma Rede de Petri é um dispositivo que manipula eventos de acordo com certas regras. Uma de suas características é que inclui condições explícitas sob as quais um evento pode ser ativado; isto permite a representação de SED gerais cuja operação depende de esquemas de controle potencialmente complexos. Esta representação é convenientemente descrita graficamente, resultando em gráficos de Rede de Petri. Estes modelos foram inicialmente desenvolvidos por Carl Adam Petri no início dos anos 60.

Os gráficos da Rede de Petri são intuitivos e capturam muita informação estrutural sobre os sistemas. Um autômato pode sempre ser representado como uma Rede de Petri; por outro lado, nem todas as Redes de Petri podem ser representadas como autômatos de estados finitos. Consequentemente, Redes de Petri podem representar uma classe maior de linguagens do que a classe de linguagens regulares.

Outra motivação para considerar os modelos de Redes Petri de SED é o corpo de técnicas de análise que foram desenvolvidas para estudá-los. Estas técnicas incluem análise de acessibilidade, bem como técnicas linear-algébricas. Tais técnicas cobrem não somente modelos lógicos da Rede de Petri, mas também, modelos cronometrados da Rede de Petri.

Importante ressaltar que o controle das Redes de Petri é uma área de pesquisa ativa e existem técnicas de síntese de controlador que exploram as propriedades estruturais das Redes de Petri (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

### 2.2.1 Princípios básicos da Rede de Petri

O processo de definição de uma Rede de Petri envolve duas etapas. Primeiro, definimos o gráfico de Rede de Petri, também denominado estrutura de Rede de Petri. Em seguida, associamos a este gráfico um estado inicial, um conjunto de estados marcados e uma função de rotulagem de transição, resultando no modelo completo de Rede de Petri, sua dinâmica associada e as linguagens que ele gera e marca (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

## 2.2.2 Notações e definições da Rede de Petri

Nas Redes de Petri, os eventos são associados a transições. Para que uma transição ocorra, várias condições devem ser satisfeitas. As informações relacionadas a essas condições estão contidas em locais. Alguns desses locais são vistos como a "entrada" para uma transição; eles estão associados com as condições necessárias para que essa transição ocorra. Outros lugares são vistos como a saída de uma transição; eles estão associados a condições que são afetadas pela ocorrência dessa transição. Transições, lugares e certas relações entre eles definem os componentes básicos de um gráfico de Rede de Petri.

Um gráfico de Rede de Petri tem dois tipos de nós, lugares e transições, e arcos que os conectam. É um gráfico bipartido no sentido de que arcos não podem conectar diretamente nós do mesmo tipo; em vez disso, os arcos conectam nós de lugar a nós de transição e nós de transição para posicionar nós.

Ao desenhar gráficos de Rede de Petri, diferencia-se entre os dois tipos de nós, locais e transições. A convenção é usar círculos para representar lugares e barras ou retângulos para representar transições.

Os arcos que conectam lugares e transições são direcionados. Geralmente, representa-se pesos através de múltiplos arcos em um gráfico. No entanto, quando grandes pesos estão envolvidos em uma Rede de Petri, escrever o peso no arco é uma representação muito mais eficiente. Se nenhum peso for mostrado em um arco de um gráfico de Rede de Petri, assume-se que ele é 1 (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008). Na figura (1) da seção 2.2.4 apresenta-se um exemplo da modelagem.

O modelo formal para definir Redes de Petri baseia-se em um grafo e dois tipos de nós e seu comportamento dinâmico, um conjunto de matrizes cujo comportamento é descrito por um sistema linear e um sistema de regras representado em condição e ação (CARDOSO; VALETTE, 1997).

Assim, uma Rede de Petri segundo a definição de Cardoso e Valette (1997) é uma quádrupla:

$$R = \langle P; T; Pre; Post \rangle \quad (3)$$

onde:

- $P$  é um conjunto finito de lugares e de dimensão  $n$ ;
- $T$  é um conjunto finito de transições e de dimensão  $m$ ;
- $Pre: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a aplicação de entrada (lugares que precedem), com  $\mathbb{N}$  sendo o conjunto dos números naturais;
- $Post: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a aplicação de saída (lugares seguintes).

### 2.2.3 Fichas e transição de estado

Relembrando de que as transições em um gráfico de Rede de Petri representam os eventos que conduzem um SED e que os lugares descrevem as condições sob as quais esses eventos podem ocorrer, descritos anteriormente, nesse contexto, necessita-se de um mecanismo que indique se essas condições estão de fato preenchidas ou não. Esse mecanismo é fornecido pela atribuição de fichas a lugares. Um símbolo é algo que "colocamos em um lugar" essencialmente para indicar o fato de que a condição descrita por esse lugar é satisfeita.

Para definir o mecanismo de transição de estado, precisamos primeiro introduzir a noção de transição habilitada. Basicamente, para uma transição para "acontecer" ou para "ser habilitado", exigimos que uma ficha esteja presente em cada lugar (isto é, condição) que é introduzido na transição.

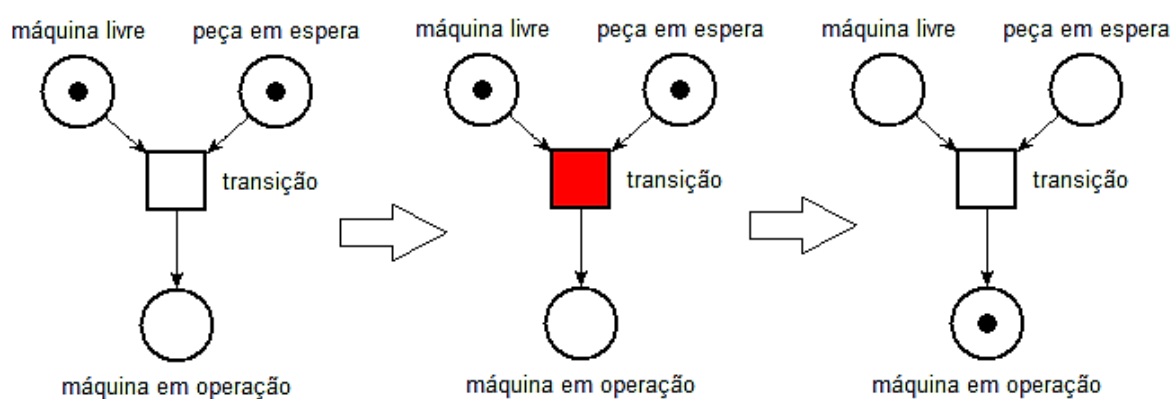
A transição na Rede de Petri é habilitada quando o número de fichas em nos lugares é pelo menos tão grande quanto o peso do arco que liga o lugar a transição. Fichas são o mecanismo usado para determinar a satisfação das condições. O conjunto de transições ativadas em um dado estado da Rede de Petri é equivalente ao evento ativo definido em um dado estado (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

### 2.2.4 Dinâmica da Rede de Petri

Em autômatos, o mecanismo de transição de estado é capturado

diretamente pelos arcos que conectam os nós (estados) no diagrama de transição de estados, equivalentemente pela função de transição.

O mecanismo de transição de estado em Rede de Petri é fornecido movendo fichas através da rede e, portanto, mudando o estado da rede. Quando uma transição é ativada, dizemos que ela pode indiciar ou que ela pode ocorrer. A função de transição de estado de uma Rede de Petri é definida através da mudança no estado devido ao movimento de uma transição habilitada (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).



**Figura 1 – Exemplo de Rede de Petri e sua simulação.**  
**Fonte: Adaptado de Cardoso e Valette (1997).**

Com a evolução do sistema, devido a cada evento relacionado a uma transição é representado, no modelo, pelo disparo da transição ao qual este está associado.

### 2.2.5 Análise de alcançabilidade

As análises da Rede de Petri podem ser divididas em dois grupos: análise de alcançabilidade (comportamento da rede) ou análise estrutural (verificando propriedades estáticas).

Para analisar a alcançabilidade, necessita-se analisar as propriedades dinâmicas que tem a ver com o seu comportamento e modificação durante o funcionamento. São assim, dependentes da marcação da rede (estágio de execução em que a rede se encontra).

### 2.2.5.1 Vivacidade

Uma Rede de Petri é dita viva se for possível executar todas as suas ações por qualquer uma das marcações que são alcançáveis da rede (MARRANGHELLO, 2005).

Diz-se viva se existir sempre algum caminho de amostra tal que qualquer transição possa eventualmente disparar de qualquer estado atingido a partir do estado inicial (CASSANDRAS, LAFORTUNE, 2008).

### 2.2.5.2 Limitação

Uma Rede de Petri é dita ser  $k$ -limitada ou simplesmente limitada se o número de marcas em cada lugar não exceder um número finito  $k$  para qualquer marcação alcançável de marcação inicial, isto é, para cada lugar e para cada marcação pertencente a rede de marcação inicial. Uma rede de Petri é dita ser segura ou estritamente limitada se é 1-limitada (MARRANGHELLO, 2005).

### 2.2.5.3 Reversibilidade

Uma Rede de Petri é dita reversível se, existir uma marcação base, acessível de qualquer outra marcação do conjunto de alcançabilidade da rede. Desta forma, em uma rede reversível é sempre possível retornar ao estado inicial (MARRANGHELLO, 2005).

## 2.2.6 Análise estrutural

Pela análise estrutural da rede, permite-se que informações adicionais sobre o comportamento, definida através de componentes conservativos de lugar (conjuntos de lugares da rede nos quais a soma das marcas é constante durante todo o seu funcionamento) e repetitivos estacionários (conjuntos de



transições da rede que ao serem disparadas em determinada sequência retornam à marcação de partida) (MARRANGHELLO, 2005).

Os invariantes em uma Rede de Petri representam os componentes conservativos e repetitivos da rede. Há conjuntos de lugares e de transições da rede cujo comportamento não se altera durante o seu funcionamento. A identificação e a interpretação de cada um destes conjuntos são importantes, pois, eles refletem certas propriedades da rede que podem ser de interesse para a análise do sistema modelado.

#### 2.2.6.1 Invariantes de lugar

Invariante de lugar é uma função linear da marcação dos lugares onde o valor é uma constante que depende apenas da marcação inicial da rede. Corresponde a uma restrição sobre os estados e as atividades do sistema que será sempre verificada, quaisquer que sejam suas evoluções. O conjunto de lugares que formam um componente conservativo da rede (CARDOSO, VALETTE, 1997).

#### 2.2.6.2 Invariantes de transição

O invariante de transição corresponde a uma sequência cíclica de eventos que pode ser repetida indefinidamente. Onde o disparo de uma sequência de transição, a partir da marcação inicial leva de volta a mesma marcação, formando um componente repetitivo estacionário da rede (CARDOSO, VALETTE, 1997).

#### 2.2.7 Matriz incidência

A matriz de incidência serve para representar a estrutura dos sistemas. Ela representa a incidência dos arcos de entrada e saída em cada transição da rede.

Uma Rede de Petri pode associar-se a um grafo com dois tipos de nós: nós lugares e nós transições.

- Um arco liga um lugar  $p$  a uma transição  $t$  se, e somente se,  $Pre(p;t) \neq 0$ .
- Um arco liga uma transição  $t$  a um lugar  $p$  se, e somente se,  $Post(p;t) \neq 0$ .

A partir dos elementos  $a_{ij} = Pre(p_i, t_j)$  que indicam o peso do arco ligando o lugar de entrada  $p_i$  à transição  $t_j$ , define-se a matriz de incidência anterior  $Pre$  de dimensão  $n \times m$  classificando como o número de linhas é igual ao número de lugares e o número de colunas é igual ao número de transições. Da mesma forma, a matriz de incidência posterior  $Post$  de dimensão  $n \times m$  é definida a partir dos elementos  $b_{ij} = Post(p_i, t_j)$ . Os valores não nulos das matrizes  $Pre$  e  $Post$  são associados aos arcos do grafo como pesos. Se o valor é unitário, não é necessário indicar no arco correspondente no grafo. Da mesma forma, se nada é indicado no grafo, o valor correspondente na matriz é unitário (CARDOSO; VALETTE, 1997).

A partir de  $Pre$  e  $Post$  definidos calcula-se a matriz de incidência  $C$ :

$$C = Post - Pre \quad (4)$$

A matriz de incidência é a melhor representação e coleta de dados da rede, pois, fornece o balanço de fichas na rede quanto ao disparo das transições.

A matriz de incidência serve para retirar informações importantes da rede, as quais devem ser utilizadas nas análises comportamentais, ou seja, análises baseadas no comportamento da rede definido pelo fluxo de fichas (CARDOSO; VALETTE, 1997).

#### 2.2.8 Equação fundamental

A equação fundamental, ou equação de estados, possibilita a análise da alcançabilidade das marcações, bem como o número de vezes que cada transição deve ser disparada para que se obtenha a marcação desejada (MURATA, 1977).

A Equação Fundamental das Redes de Petri é:

$$M'(p) = M0(p) + C.s, \quad \forall p \in P \quad (5)$$

Onde  $s$  é o vetor característico cujos componentes são naturais e representam o número de vezes que cada transição foi disparada para obter-se a marcação desejada  $M'(p)$  a partir da marcação inicial  $M0(p)$ , e  $C$  é a matriz de incidência.

### 3 ABORDAGEM DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS NO ESTUDO DA PLANTA INDUSTRIAL DIDÁTICA

Nessa seção, apresenta-se generalidades da Planta Didática Industrial, bem como a infraestrutura básica, operações e informações importantes para o desenvolvimento da modelagem através de sistemas a eventos discretos.

#### 3.1 PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL - GENERALIDADES

A planta didática disponibiliza os processos de controle e supervisão em uma visão fiel à realidade da automação industrial, porém em escala reduzida (SMAR, 2012). Segundo Silva, Endo e Lisboa (2011) ela apresenta uma arquitetura baseada em um sistema de controle com uma rede de comunicação industrial, um Controlador Lógico Programável (CLP) e um controlador Profibus-PA. Abaixo está a imagem da planta (Figura 2).



**Figura 2 – Planta didática industrial SMAR**  
Fonte: SMAR (2012).

A Planta Didática não tem como objetivo o processo de produção de nenhum produto, sendo essa apenas para o estudo e realização de experimentos que podem

ser aplicados em processos reais. O seu funcionamento, consiste na circulação de líquido em tanques podendo existir estratégias diferentes de atuação sobre esse líquido. A planta possui um tanque central (reservatório) que tem a função de armazenar o líquido que será enviado para os tanques e depois retornar. Para ser transportado deste tanque central, o líquido passa por duas bombas, sendo que uma vai para o tanque de aquecimento e a outra para o tanque de mistura. Na entrada de cada um desses tanques possui um controlador de vazão, sendo esta comandada pelo sinal analógico vindo do CLP, existindo também válvulas de operação manual (OLIVEIRA et al., 2012).

### 3.2 INFRAESTRUTURA BÁSICA

As condições necessárias para ligar a planta didática são:

- Alimentação Elétrica:
  - 110Vca, 60Hz, 50W para o circuito de comando e alimentação; e
  - 220Vca, 60Hz, 50W para o conversor de potência.
- Suprimento de ar:
  - Posicionadores em 4bar; e
  - Atuadores das válvulas (60 psi).
- Ligação para entrada de água;
- Ligação para saída de água para escoamento (SMAR, 2012).

### 3.3 OPERAÇÕES DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

As operações da planta didática, segundo Smar (2012), antecedentes aos processos de controle e automação desejados, seguem abaixo.

1. Verificar os disjuntores (geral/conversor) localizados atrás do painel. Eles devem estar na posição ON (energizados);
2. Verificar as conexões da rede elétrica, alimentação 110v/220v, conexões (entrada/saída) de água e suprimento de ar;

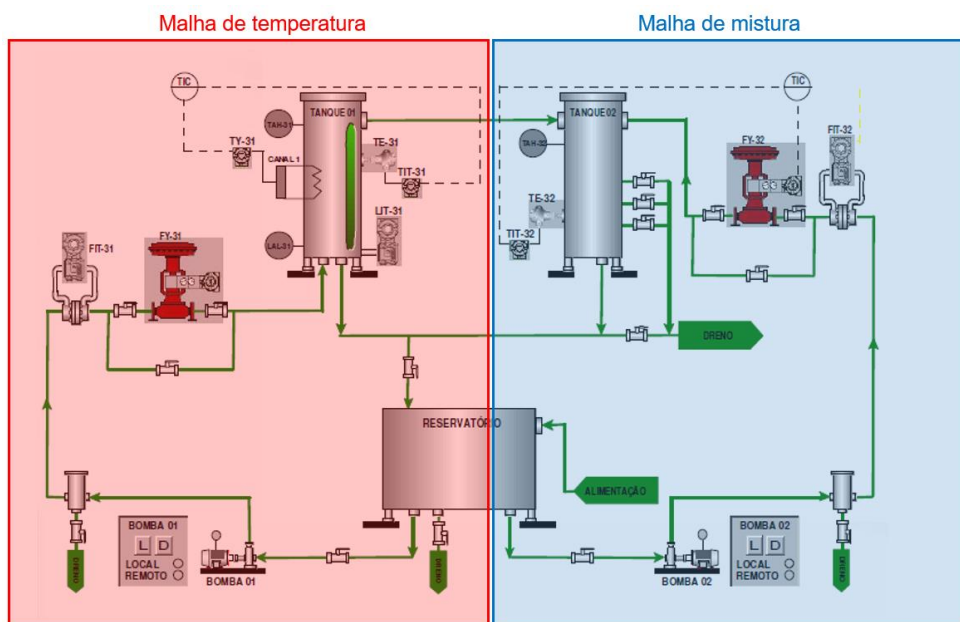
3. Ligar a chave “Geral” (pos. ON=energizados), localizada no centro do painel, verificando os displays (indicadores) dos transmissores, conversores, leds do DF73 e DF75;
4. Verificar o nível do reservatório de água (50% ou acima);
5. Acionar a bomba “1” que alimenta o tanque de aqueci/o, verificando o nível do mesmo. Em seguida, fechar a válvula de retorno para o reservatório. Também verificar o desacionamento do alarme de nível “baixo”, condição necessária para início do aquecimento;
6. Acionar a bomba “2” que alimenta o tanque de mistura, verificando a posição das válvulas (consumidores) em relação ao nível do tanque. A válvula de dreno deve estar aberta;
7. Ligar o microcomputador. Abrir o “CONF700” e selecionar o projeto desejado;
8. Iniciar o procedimento de comunicação para o respectivo projeto;
9. Abrir o PROCESS VIEW, através do ícone TRAY, que irá dar o start nos componentes utilizados na planta;
10. Verificar a atualização/comunicação dos pontos animados nas seguintes telas: sinótico, sintonia, CLP, comunicação;
11. Dar início a operação no *PROCESS VIEW*.

Através das telas de sinótico presentes a seguir (Figura 3, Figura 4 e Figura 5) e nos itens a seguir são detalhadas as operações para controle da planta.

A planta possui duas malhas de controle principais, que são de temperatura e de mistura - Figura 3.

A malha de temperatura, após efetuar o controle de manter a temperatura do tanque de aquecimento (Tanque 1) em um valor fixo, recebe um ganho proveniente da vazão de água para acelerar a demanda de potência necessária para manter a temperatura constante. A vazão de água pode ser controlada via código MatLab.

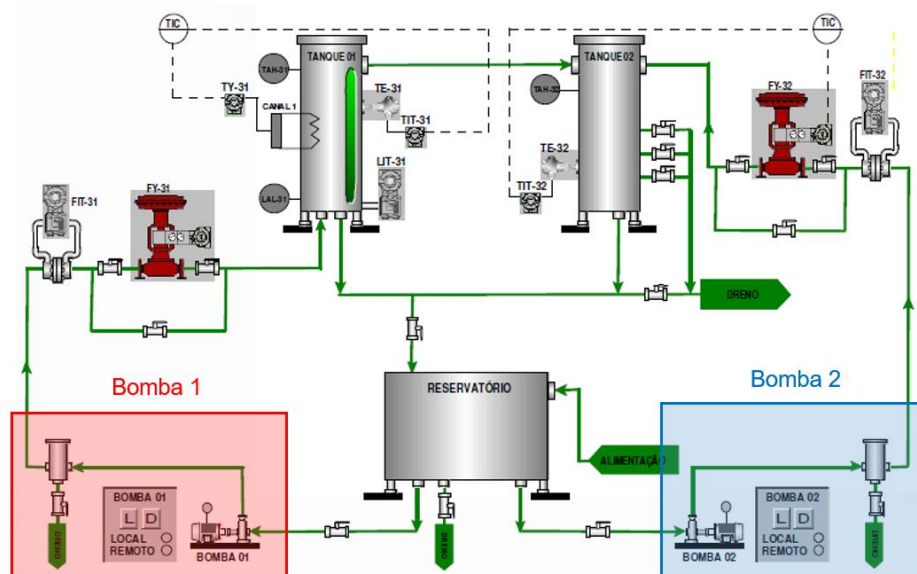
Na malha de mistura, a água quente proveniente do tanque de aquecimento é misturada com água fria (vinda do reservatório) no tanque de mistura (Tanque 2). A finalidade deste controle é manter a temperatura da água no tanque de mistura respondendo às variações de temperatura da água do tanque de aquecimento. A malha de vazão de água fria recebe como *set-point* a saída do controle de temperatura do tanque de mistura provocando, assim, a ação da válvula de água fria quando a temperatura for diferente da solicitada. (SMAR, 2012).



**Figura 3 – Sinótico das malhas de controle da planta didática.**  
 Fonte: adaptado de SMAR - treinamento (2012).

### 3.3.1 Bombas hidráulicas

Existem duas bombas hidráulicas (Bomba 1 e Bomba 2) na planta didática (para o tanque de aquecimento e tanque de mistura). Elas são responsáveis por promover a circulação de água pelas tubulações e nos tanques. Cada uma delas mandam a água para o seu respectivo tanque.



**Figura 4 – Bombas da planta didática.**  
 Fonte: adaptado de SMAR - treinamento (2012).

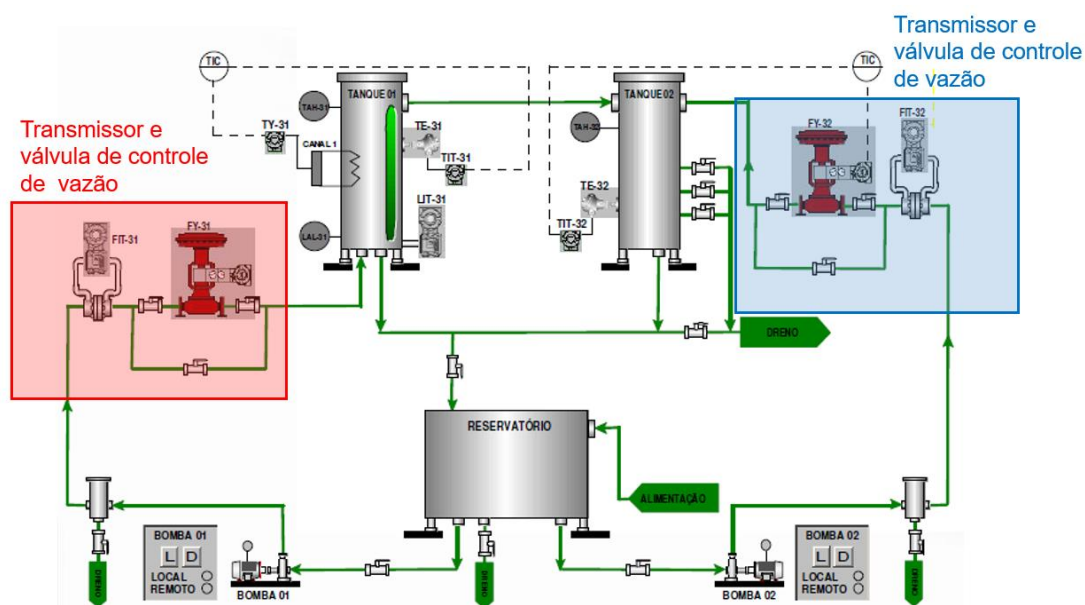
### 3.3.2 Válvulas de controle, rotômetros e transmissores

Na planta didática existem duas válvulas de controle do tipo globo que são responsáveis pelo controle do fluxo de água na planta.

Os dois rotômetros presentes na planta didática têm a função de indicador para o valor instantâneo da vazão de água no respectivo circuito.

Os transmissores de pressão diferencial são utilizados na medição de nível e vazão na planta didática.

Os transmissores de temperatura SMAR permitem que um simples equipamento aceite diferentes tipos de sensores de temperatura disponíveis no mercado, como termopar e termo resistências, incluindo células de carga e indicadores de posição resistivos (SMAR, 2012).



**Figura 5 – Transmissor e válvula de controle de vazão da planta didática.**  
Fonte: adaptado de SMAR - treinamento (2012).

### 3.4 INFORMAÇÕES PARA A MODELAGEM ATRAVÉS DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS DA PLANTA

Os processos da planta didática industrial (aquecimento e mistura) são processos contínuos e dentre os três níveis de abstração para análise de um sistema contínuo em um sistema discreto (item 2.1.2 Níveis de abstração no estudo do sistema a eventos discretos), o interesse principal para a modelagem da planta é o



"comportamento lógico" do sistema, isto é, assegurar que ocorra uma ordenação precisa dos eventos, satisfazendo um dado conjunto de especificações.

Considera-se, então, as tomadas de decisões da planta, requisitos para a modelagem e sequenciamento dos eventos e os devidos estados do sistema.

Os sensores respondem aos estados do sistema (informação), os atuadores respondem as transições que são os requisitos necessários de cada estado acontecer (ação).

Os equipamentos que provem as informações de estado e ações da planta didática são:

- Mesa metálica que é a estrutura que suportará a fixação dos elementos da planta e onde são feitas as montagens mecânicas e elétricas: equipamentos para medição e atuação, tubulação, placa de montagem elétrica, eletrodutos, rodas com amortecedores e tanques (sistema);
- Duas bombas hidráulicas;
- Duas válvulas de Controle do tipo globo que são responsáveis pelo controle do fluxo de água na planta;
- Posicionador;
- Dois rotômetros de água que tem a função de indicador do valor instantâneo da vazão de água no respectivo circuito;
- Chave de nível que é responsável por detectar nível baixo no tanque de água quente. Ao acusar nível baixo a chave de nível enviará um comando para o painel de controle;
- Os eletrodos (sensores) são dispostos nas alturas onde se deseja controlar os níveis do líquido, no reservatório;
- Conversor estático utilizado para alimentar as resistências elétricas responsáveis por aquecer a água;
- Duas resistências de imersão que ficam no tanque e provocam o aquecimento da água;
- Termostato localizado no tanque de água quente e tem a função de enviar um sinal para inibir o conversor estático por meio de um contato quando a temperatura atingir um limite de temperatura alta;
- Sensor de temperatura tipo termo resistência, PT100, responsável por medir a temperatura da água no tanque de água quente; e

- Sensor de temperatura tipo termopar, tipo J, responsável por medir a temperatura da água no tanque de mistura.

Assim, torna-se possível definir os estados e transições para a modelagem de sistemas a eventos discretos.

## 4 METODOLOGIA DA MODELAGEM DO SISTEMA DA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Este capítulo apresenta a definição dos processos sequenciais da planta didática e as tomadas de decisões levantadas de cada processo definido.

### 4.1 DEFINIÇÃO DOS PROCESSOS SEQUENCIAIS

Com a abstração necessária para considerar processos contínuos em processos discretos e com o principal intuito de assegurar a acessibilidade do sistema e visualização gráfica do comportamento lógico e sequencial para a modelagem em Rede de Petri, definiu-se 4 processos sequenciais:

1. Processo antes de ligar a planta didática;
2. Processo para preparar os tanques antes das operações de controle;
3. Processo de aquecimento; e
4. Processo de mistura.

Os processos principais são de aquecimento, (3), e mistura, (4), pois são onde ocorrem as operações de controle e automação da planta. É possível dividir estes 4 processos em 4 Redes de Petri, sendo que cada uma delas segue o sequenciamento determinado acima e são dependentes um do outro.

A modelagem do sistema é a junção dessas 4 modelagens.

### 4.2 TOMADAS DE DECISÕES

Para analisar os eventos, bem como os seus estados, dependências e sequenciamento do sistema, levantou-se todas as tomadas de decisões necessárias para os processos definidos.

#### 4.2.1 Processo antes de ligar a planta didática

Antes de ligar a planta didática, são necessários alguns requisitos para o seu funcionamento. Os 4 requisitos principais são:

1. Disjuntores ligados;
2. Alimentação (110/220V) adequada;
3. Entrada e saída de água disponíveis;
4. Compressor ligado.

Para o requisito de entrada e saída de água disponíveis é necessário considerar logo em sequência o nível do reservatório que deve estar maior ou igual a 50%. E para o requisito de compressor ligado, em seguida o distribuidor de ar deve estar fechado, e também a pressão deve ser ajustada em mais ou menor 4bar.

Os eventos e estados observados estão descritos na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 – Eventos e estados do processo antes de ligar a planta didática.

Tomadas de decisões	Eventos			Estados	
	Disjuntores	Ligar	Desligar	Ligado	Desligado
Alimentação (110/220V)	Conectar	Desconectar	Alimentação OK	Alimentação Não	
Entrada/Saída de água	Abrir	Fechar	Entrada/Saída de água OK	Entrada/Saída de água Não	
Nível do reservatório (Depende da entrada/saída de água OK)	Verificar nível baixo	Verificar nível acima	Encher	Nível OK	Nível baixo
Compressor	Ligar comp.	Desligar comp.	Ligado comp.	Desligado comp.	
Distribuidor de ar	Fechar distribuidor	Abrir distribuidor	Distribuidor aberto	Distribuidor fechado	
Pressão (Depende do Ligado comp. e Distribuidor fechado)	Verificar pressão	Manter	Ajustar pressão	Pressão	Pressão OK

E assim, para que o evento: Ligar PLANTA ocorra, são necessários que os disjuntores estejam no estado ligado, a alimentação esteja OK, o nível do reservatório esteja OK e a pressão esteja OK. Assim, é possível ir para o estado: Planta LIGADA.

#### 4.2.2 Processo para preparar os tanques antes das operações de controle

Considerando que a planta está ligada (item 4.2.1) (estado inicial) é necessário atender alguns requisitos antes de iniciar as operações de controle. Para isto, segue as tomadas de decisões abaixo.

Para encher o tanque 1 (evento) são necessários:

- ✓ Planta ligada (estado);
- ✓ Bomba 1 ligada (estado); e
- ✓ Válvula do tanque 1 que vai para o reservatório fechada (estado).

Para ligar a bomba 1 (evento) é necessário:

- ✓ Bomba 1 desligada.

Para desligar a bomba 1 (evento) é necessário:

- ✓ Bomba 1 ligada.

Para abrir a válvula do tanque 1 que vai para o reservatório (evento) é necessário:

- ✓ Válvula do tanque 1 que vai para o reservatório fechada (estado).

Para fechar a válvula do tanque 1 que vai para o reservatório (evento) é necessário:

- ✓ Válvula do tanque 1 que vai para o reservatório aberta (estado).

Para inibir o alarme de nível (evento) são necessários:

- ✓ Sensor de nível estar cheio; e
- ✓ Alarme de nível baixo estar acionado.

Se as condições acima forem atendidas até chegar no último evento (inibir o alarme de nível) o estado do tanque 1 passa estar preparado.

Para ligar o Microcomputador (evento) é necessário:

- ✓ Microcomputador estar desligado.

Para abrir o supervisor (evento) é necessário:

- ✓ Microcomputador estar ligado.

Para abrir um projeto (evento) é necessário:

- ✓ Microcomputador estar ligado.

Para verificar se a comunicação e atualizações do sistema supervisorio (evento) é necessário:

- ✓ Estar com o *ProcessView* aberto.

Se as condições acima forem atendidas até chegar no último evento (verificar as comunicações e atualizações do sistema supervisorio) atinge-se os estados: sinótico de acordo, sintonia de acordo, CLP de acordo e comunicação correta.

Para encher o tanque 2 (evento) são necessários:

- ✓ Planta ligada (estado);
- ✓ Bomba 2 ligada (estado);
- ✓ Válvula dreno do tanque 2 aberta (estado); e
- ✓ Nível do tanque 2 (consumidores) determinado.

Para abrir a válvula dreno do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula dreno do tanque 2 fechada (estado);

Para fechar a válvula dreno do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula dreno do tanque 2 aberta (estado);

Para ligar a bomba 2 (evento) é necessário:

- ✓ Bomba 2 desligada.

Para desligar a bomba 2 (evento) é necessário:

- ✓ Bomba 2 ligada.

Para abrir a válvula 1 do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 fechada (estado);

Para fechar a válvula 1 do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 aberta (estado);

Para abrir a válvula 2 do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula 2 do tanque 2 fechada (estado);

Para fechar a válvula 2 do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula 2 do tanque 2 aberta (estado);

Para abrir a válvula 3 do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula 3 do tanque 2 fechada (estado);

Para fechar a válvula 3 do tanque 2 (evento) é necessário:

- ✓ Válvula 3 do tanque 2 aberta (estado);

Para ajustar o nível em 1 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 aberta (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 fechada (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 fechada (estado).

Para ajustar o nível em 12 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 fechada (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 aberta (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 fechada (estado).

Para ajustar o nível em 3 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 fechada (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 fechada (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 aberta (estado).

Para ajustar o nível em 1 e 2 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 aberta (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 aberta (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 fechada (estado).

Para ajustar o nível em 1e 3 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 aberta (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 fechada (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 aberta (estado).

Para ajustar o nível em 2 e 3 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 fechada (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 aberta (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 aberta (estado).

Para ajustar o nível em 1 e 2 e 3 (consumidor) são necessários:

- ✓ Válvula 1 do tanque 2 aberta (estado);
- ✓ Válvula 2 do tanque 2 aberta (estado); e
- ✓ Válvula 3 do tanque 2 aberta (estado).

Para verificar se os níveis estão certos (eventos) são necessários os seus estados correspondentes (estado de nível 1; ou 2; ou 3; ou 1 e 2; ou 1 e 3; ou 2 e 3; ou 1 e 2 e 3).

Se as condições acima forem atendidas até chegar no evento (encher tanque 2) atinge-se o estado de tanque 2 preparado.

Assim, para iniciar as operações (evento) são necessários:

- ✓ Tanque 1 passa estar preparado;
- ✓ Sinótico de acordo;
- ✓ Sintonia de acordo;
- ✓ CLP de acordo;
- ✓ Comunicação correta; e
- ✓ Tanque 2 preparado.

Se as condições acima forem atendidas atinge-se o estado de planta preparada para começar as operações de controle.

#### 4.2.3 Processo de aquecimento

A finalidade deste controle é manter a temperatura do tanque de aquecimento em um valor fixo atendendo as variações de temperatura proveniente da água fria. O conversor de potência é o responsável por enviar energia para um grupo de resistências elétricas para aquecer a água do tanque. A malha de temperatura, após efetuar o controle recebe um ganho proveniente da vazão de água para acelerar a demanda de potência necessária para manter a temperatura constante. Estratégia que garante variações provocadas pela entrada de água no tanque de aquecimento tenha respostas rápidas.

Os eventos necessários e as condições para ocorrer cada um deles (seus requisitos que são os estados) estão descritos na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Eventos e seus estados do processo de aquecimento.

<b>Eventos</b>	<b>Condições</b>
Iniciar controle de aquecimento	Estado de preparação OK
Determinar vazão em % (caso o fluxo seja determinado e não opte por controlar a vazão)	Estado de vazão de água OK Estado de <i>Set Point</i> determinado
Verificar tempera tudo do projeto que a vazão é apenas determinada	Estado de fluxo determinado
Aquecer projeto que a vazão é apenas determinada	Estado temperatura verificada
Esfriar projeto que a vazão é apenas determinada	Estado temperatura verificada
Manter vazão	Estado vazão determinada



Aumentar energia	Estado acionar conversor
Aumentar temperatura	Estado resistências ativadas
Diminuir vazão	Estado de válvula (diminuiu)
Verificar temperatura aumentou	Estado de vazão diminuiu e temperatura aumentou ou vazão manteve-se e temperatura aumentou
Verificar temperatura está conforme (comparar)	Estado de temperatura (sensor)
Verificar se a temperatura está baixa	Estado de vazão de água e <i>Set Point</i> determinado
Controlar vazão e aquecimento (valor baixo)	Estado do sensor de temperatura baixo e a vazão permanecer a inicial para ser controlada
Diminuir vazão	Estado válvula (diminuiu)
Verificar se a temperatura está alta	Estado de vazão de água e <i>Set Point</i> determinado
Controlar vazão e aquecimento (valor alto)	Estado do sensor de temperatura alto e a vazão permanecer a inicial para ser controlada
Inibir termostato	Estado do termostato ativado
Diminuir temperatura	Estado do conversor desativado
Verificar temperatura diminuiu	Estado de vazão aumentou e temperatura diminuiu ou vazão manteve-se e temperatura diminuiu
Verificar se a temperatura inicial já está OK	Estado de vazão de água e <i>Set Point</i> determinado
Manter a vazão inicial	Estado se já atende a temperatura

E assim, se o projeto ou o caminho desejado atender os requisitos determinados do processo de aquecimento, termina-se com os estados de fluxo de saída do tanque 1 determinado e a temperatura de acordo com a especificada. Agora, é possível aplicar técnicas de controle para o processo de mistura.

#### 4.2.4 Processo de mistura

Para o processo de mistura, a água quente vinda do tanque de aquecimento é misturada com água fria do reservatório. A finalidade deste controle é manter a temperatura da água no tanque de mistura respondendo às

variações de temperatura da água do tanque de aquecimento. A malha de vazão de água fria recebe como *Set Point*, a saída do controle de temperatura do tanque de mistura provocando assim, a ação da válvula de água fria quando a temperatura for diferente da solicitada.

Os eventos necessários e as condições para ocorrer cada um deles (seus requisitos que são os estados) estão descritos na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Eventos e seu estados do processo de mistura.

<b>Eventos</b>	<b>Condições</b>
Iniciar processo de mistura	Estado de temperatura OK e fluxo de entrada do tanque 2
Desconsiderar perdas de fluxo de um tanque para o outro (tanque de aquecimento e de mistura)	Estado de fluxo de saída do tanque 1
Controlar vazão de água do reservatório	Estado de vazão de água fria disponível
Ajustar válvula de fluxo de água fria (água do reservatório)	Estado de válvula do fluxo tanque habilitada
Misturar fluxo de água quente com o fluxo de água fria	Estado tanque 2 com água quente e água fria
Verificar temperatura baixa	Tanque 2 estar misturado
Verificar temperatura adequada	Tanque 2 estar misturado
Verificar temperatura alta	Tanque 2 estar misturado
Diminuir vazão	Estado do sensor de temperatura baixa
Manter vazão	Estado do sensor de temperatura adequada
Aumentar vazão	Estado do sensor de temperatura alta

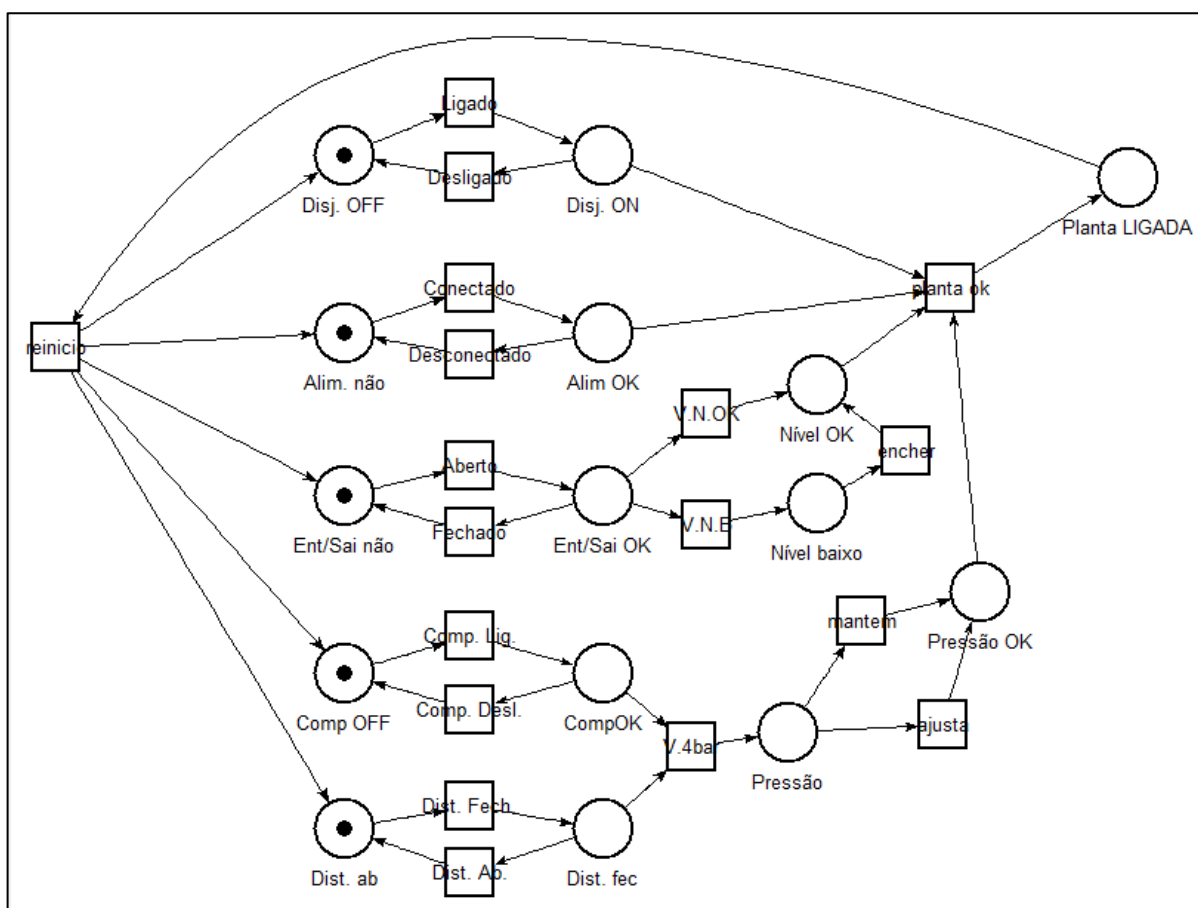
E assim, se o projeto ou o caminho desejado atender os requisitos determinados do processo de mistura, termina-se com o estado de temperatura do tanque de mistura de acordo com a especificada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresenta-se a modelagem desenvolvida na ferramenta TINA e as análises da modelo, tanto de alcançabilidade e de estrutura, essenciais para validar o resultado obtido.

### 5.1 MODELAGEM DOS PROCESSOS ATRAVES DE REDE DE PETRI

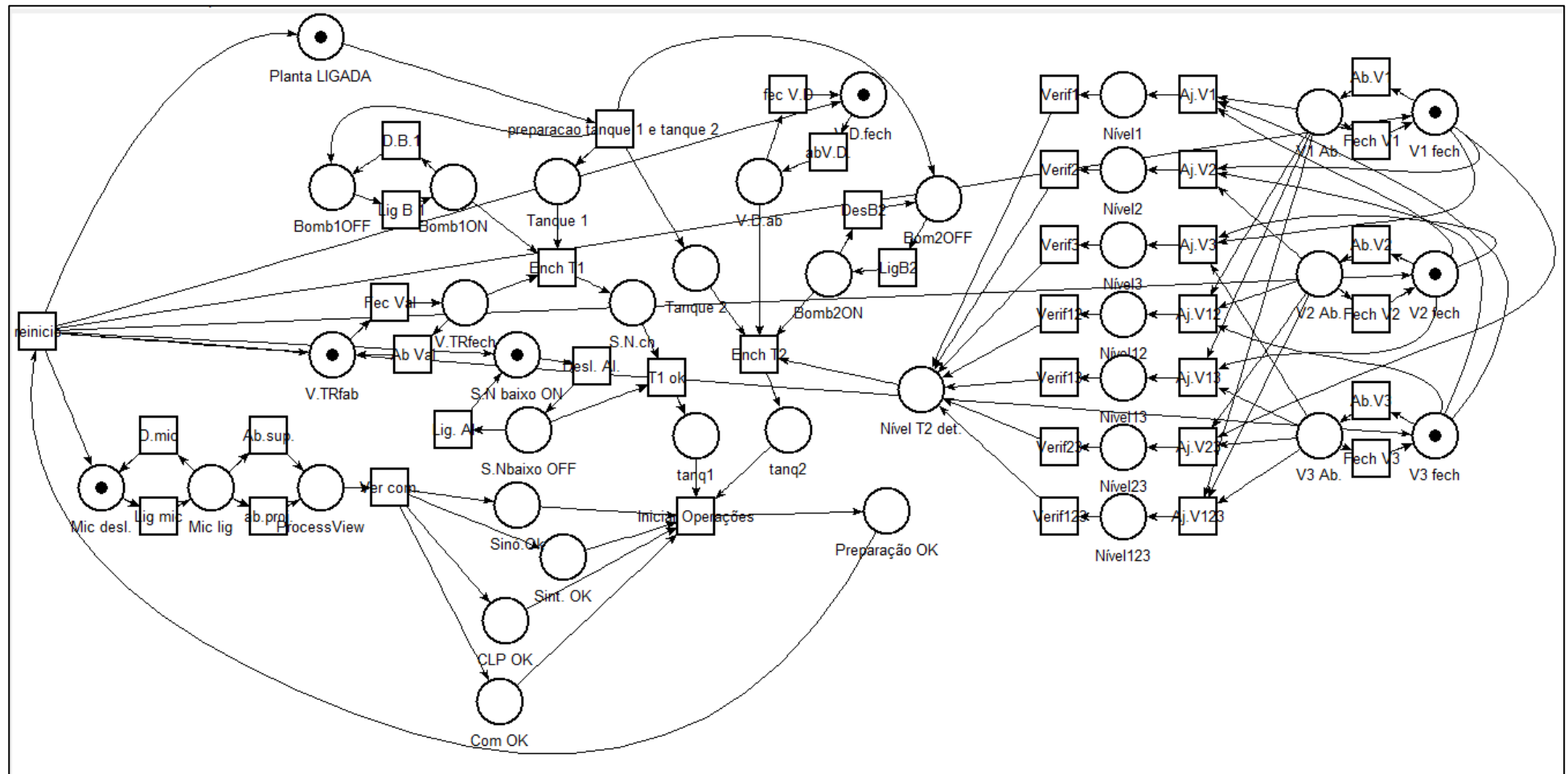
Para o processo, antes de ligar a planta, a modelagem desenvolvida apresenta-se na Figura 6.



**Figura 6 – Modelagem inicial do processo de antes de ligar a planta**  
**Fonte: Autoria própria.**

Dadas as condições iniciais da planta (infraestrutura), apresenta-se a modelagem para este processo seguindo as definições apresentadas na seção 4.2.1.

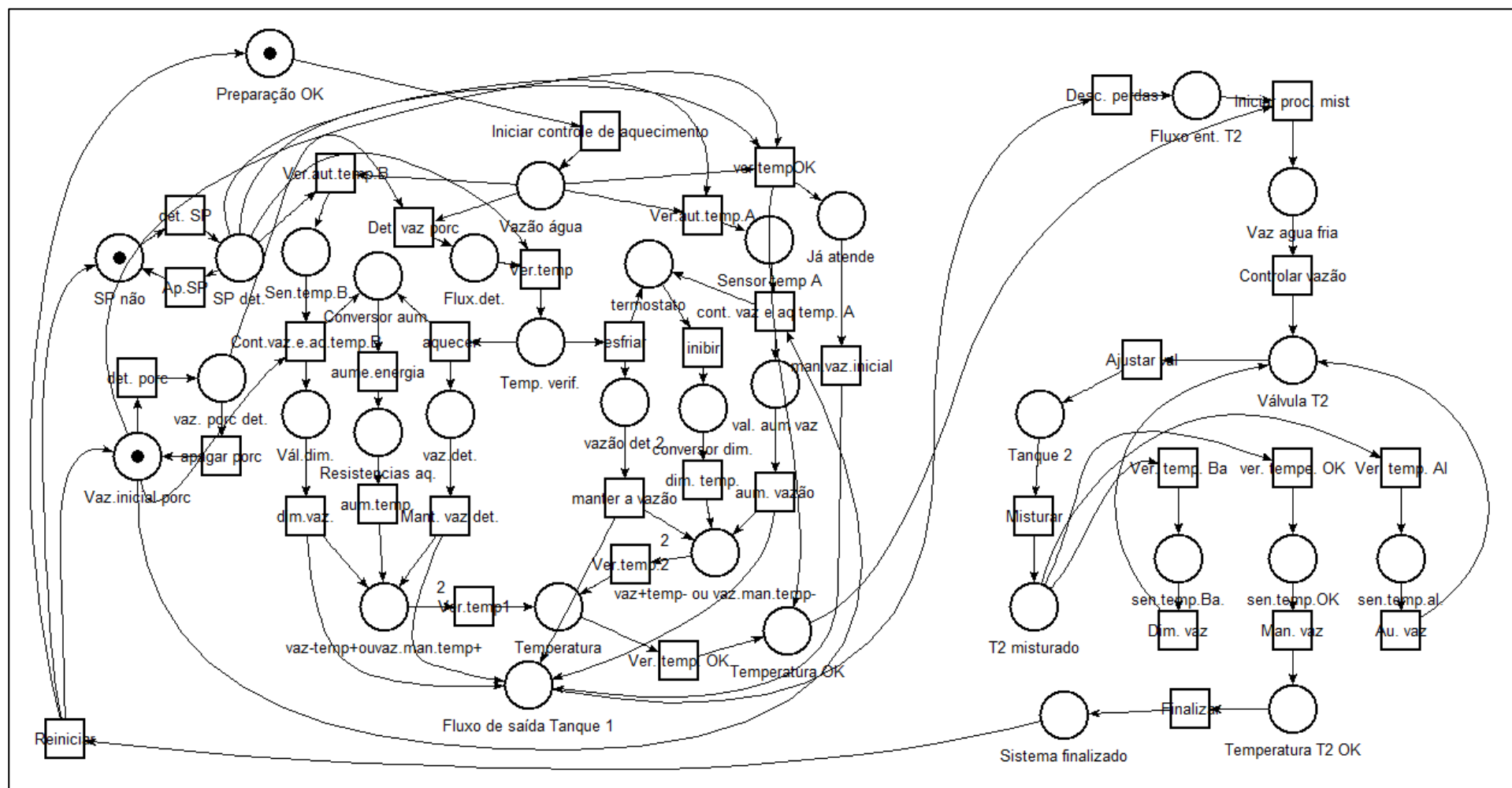
Para o processo de preparação dos tanques antes das operações, a modelagem desenvolvida apresenta-se na Figura 7.



**Figura 7 – Modelagem inicial do processo de preparar os tanques antes das operações**  
**Fonte: Autoria própria.**

Dadas as condições iniciais da planta (estados iniciais) e a condição final da modelagem anterior (Planta LIGADA), apresenta-se a modelagem para este processo seguindo as definições apresentadas na seção 4.2.2.

Como os dois processos principais são de operações da planta, processo de aquecimento e processo de mistura, e são processos dependentes um do outro, desenvolveu-se a modelagem com os processos juntos, apresentando-se na Figura 8.



**Figura 8 – Modelagem inicial do processo de aquecimento e do processo de mistura**  
**Fonte: Autoria própria.**

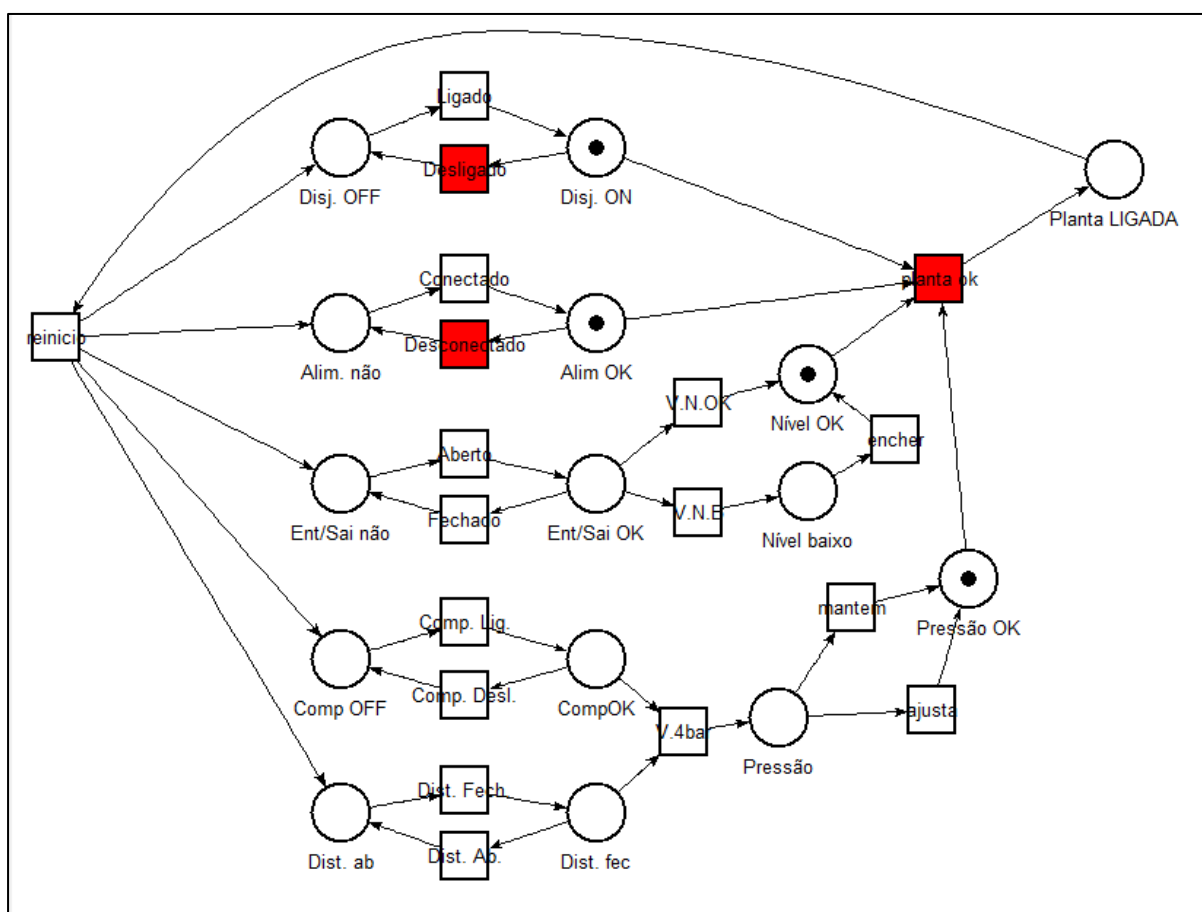
Dadas as condições iniciais da planta (estados iniciais) e a condição final da modelagem anterior (Preparação OK), apresenta-se a modelagem para este processo seguindo as definições apresentadas na seção 4.2.3 e 4.2.4.

## 5.2 ANÁLISE DA REDE DE PETRI

### 5.2.1 Simulação da evolução da Rede de Petri

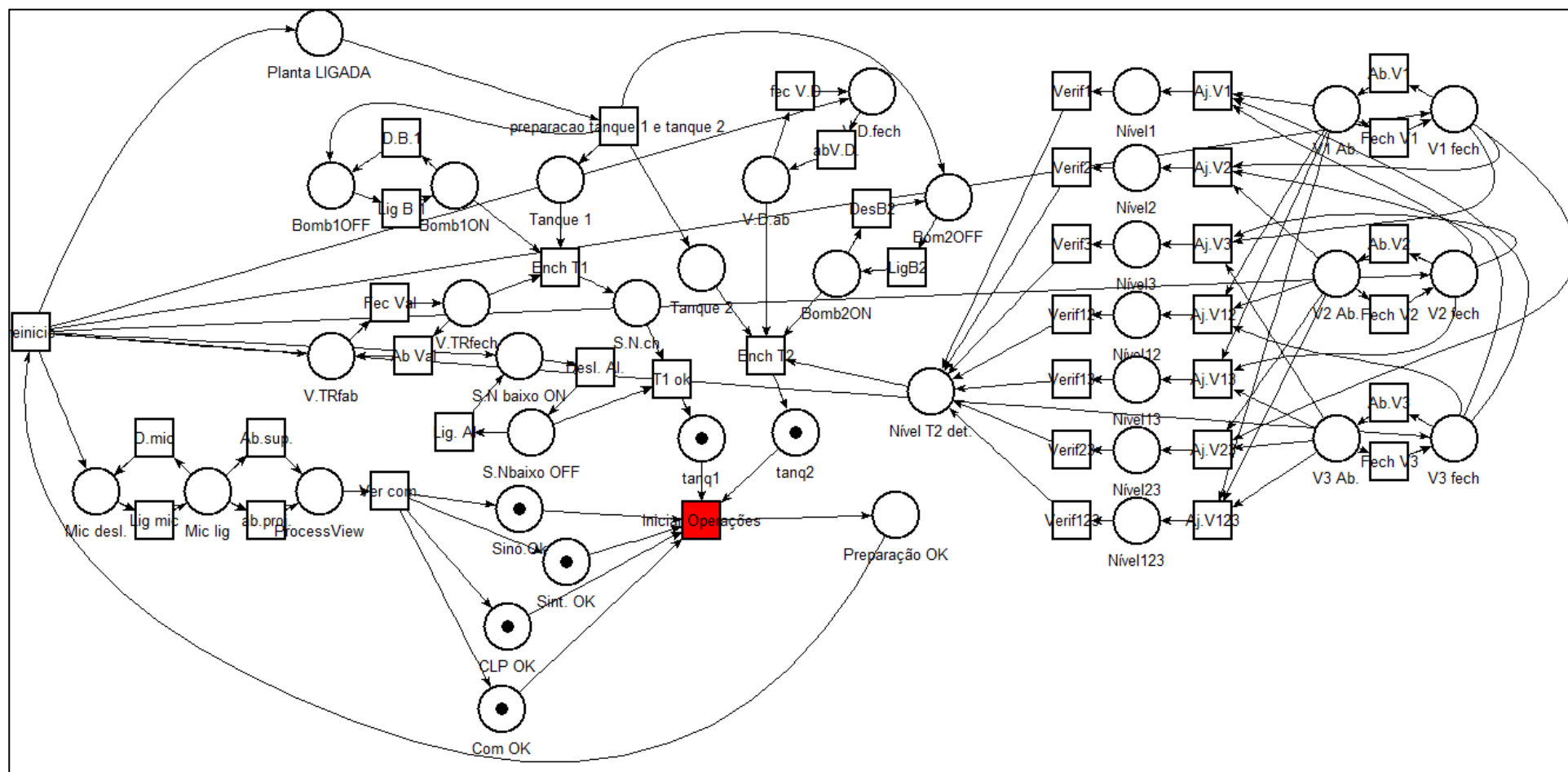
Com a ferramenta TINA e depois de modelado os processos, é possível simular a rede, atribuindo tarefas, determinado sequências e atingir marcações desejadas.

As figuras (9), (10) e (11) apresentam um estado da rede em simulação, no momento em que a transição para que a marcação final fique habilitada (com ficha) possa ocorrer o disparo (transição em vermelho).



**Figura 9 – Simulação do processo de antes de ligar a planta**  
 Fonte: Autoria própria.

Na Figura 9, a transição denominada “planta ok” está em vermelho, evidenciando que o disparo possa acontecer para que o lugar denominado “Planta LIGADA” possa ser habilitado (presença de ficha).



**Figura 10 – Simulação do processo de preparar os tanques antes das operações**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 10, a transição denominada “planta ok” está em vermelho, evidenciando que o disparo possa acontecer para que o lugar denominado “Planta LIGADA” possa ser habilitado (presença de ficha).

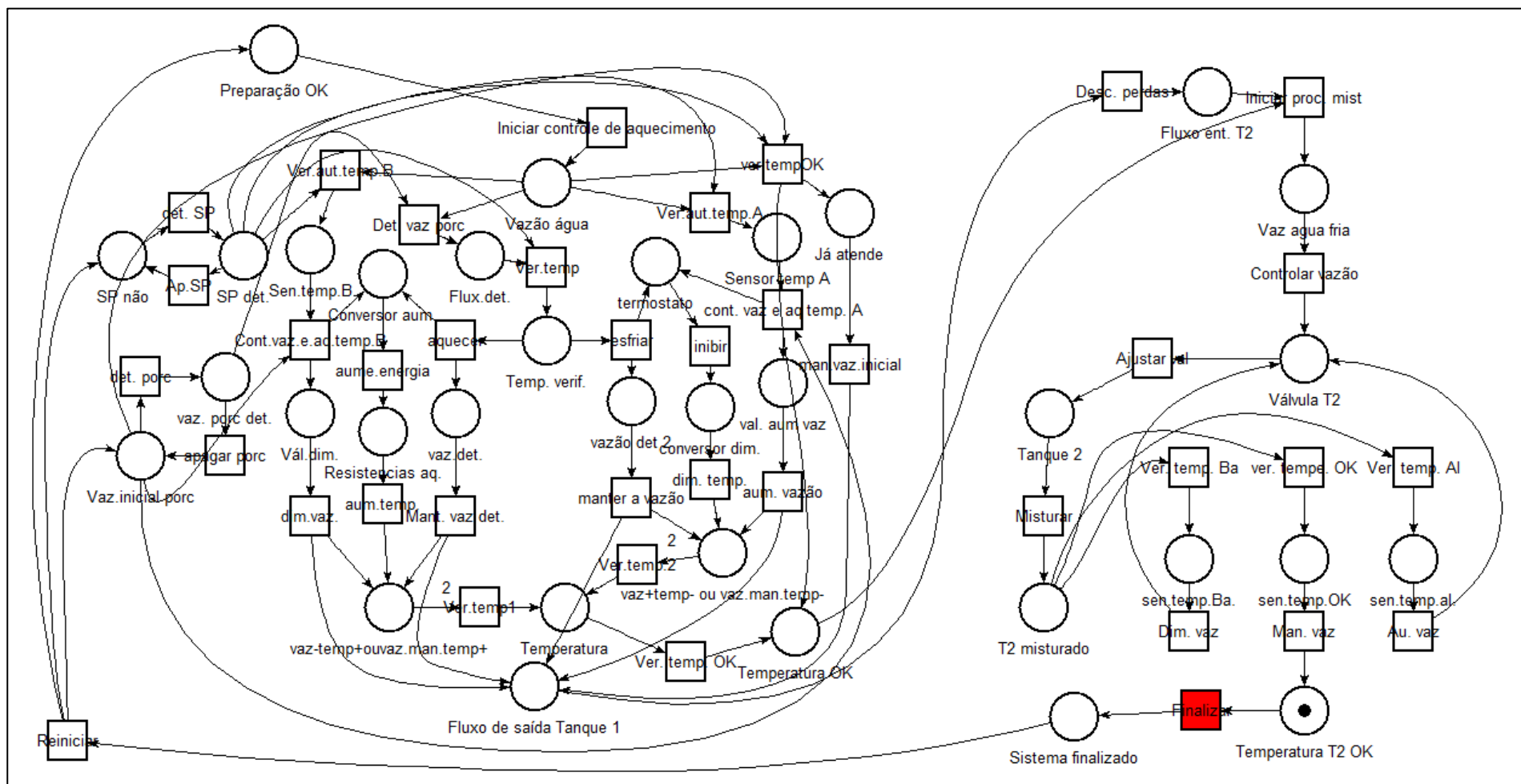


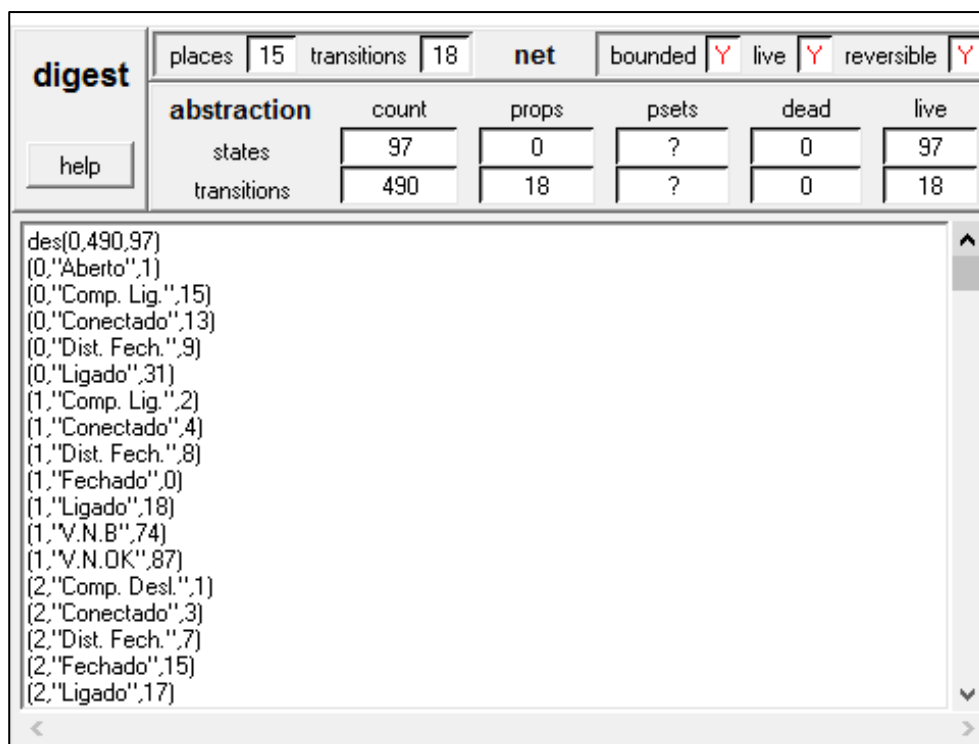
Figura 11 – Simulação do processo de aquecimento e mistura  
Fonte: Autoria própria.



Na Figura 11, a transição denominada “Finaliza” está em vermelho, evidenciando que o disparo possa acontecer para que o lugar denominado “Sistema FINALIZADO” possa ser habilitado (presença de ficha) terminando uma tarefa especificado (um projeto).

## 5.2.2 Análise de alcançabilidade

Pela ferramenta TINA, obtêm-se as informações de vivacidade, reversibilidade e limitação da rede. Os resultados obtidos apresentam-se nas figuras (12), (13) e (14).



**Figura 12 – Análise de alcançabilidade do processo de antes de ligar a planta**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na figura 12 evidencia que a rede desenvolvida para o processo “antes de ligar a planta” possui 15 lugares, 18 transições, é limitada (*bounded = Yes*), é viva (*live = Yes*) e é reversível (*reversible = Yes*).

digest	places	38	transitions	41	net	bounded	Y	live	Y	reversible	Y
	abstraction	count	props	psets	dead	live					
help	states	3373	0	?	0	3373					
	transitions	27385	41	?	0	41					

```

des(0,27385,3373)
(0,"Ab.V1",1)
(0,"Ab.V2",2592)
(0,"Ab.V3",2584)
(0,"Desl. Al.",1098)
(0,"Fec Val",2588)
(0,"Lig mic",3365)
(0,"abV.D.",2640)
(0,"preparacao tanque 1 e tanque 2 ",3148)
(1,"Ab.V2",2)
(1,"Ab.V3",2585)
(1,"Aj.V1",2475)
(1,"Desl. Al.",1099)
(1,"Fec Val",2589)
(1,"Fech V1",0)
(1,"Lig mic",3366)
(1,"abV.D.",2641)
(1,"preparacao tanque 1 e tanque 2 ",3149)

```

**Figura 13 – Análise de alcançabilidade do processo de preparar os tanques antes das operações**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na figura 13 evidencia que a rede desenvolvida para o processo “preparar os tanques antes das operações” possui 38 lugares, 41 transições, é limitada (*bounded = Yes*), é viva (*live = Yes*) e é reversível (*reversible = Yes*).

digest	places	34	transitions	39	net	bounded	Y	live	Y	reversible	Y
	abstraction	count	props	psets	dead	live					
help	states	53	0	?	0	53					
	transitions	93	39	?	0	39					

```

des(0,93,53)
(0,"Iniciar controle de aquecimento",1)
(0,"det. SP",50)
(0,"det. porc",52)
(1,"det. SP",2)
(1,"det. porc",39)
(2,"Ap.SP",1)
(2,"Ver.aut.temp.A",3)
(2,"Ver.aut.temp.B",27)
(2,"det. porc",38)
(2,"ver.tempOK",49)
(3,"cont. vaz e aq temp. A",4)
(3,"det. porc",26)
(4,"aum. vazão",5)
(4,"inibir",24)
(5,"Desc. perdas",6)
(5,"inibir",20)
(6,"inibir",7)

```

**Figura 14 – Análise de alcançabilidade do processo de aquecimento e mistura**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na figura 14 evidencia que a rede desenvolvida para o processo de aquecimento junto com o processo de mistura, possui 34 lugares, 39 transições, é limitada (*bounded = Yes*), é viva (*live = Yes*) e é reversível (*reversible = Yes*).

### 5.2.3 Análise estrutural

Pela ferramenta TINA, obtêm-se os invariantes de lugar e os invariantes de transição, importantes para analisar a estrutura da rede, verificando os componentes conservativos de lugar e os componentes repetitivos estacionários.

#### 5.2.3.1 Invariantes de lugar

Os invariantes de lugares foram obtidos através da ferramenta TINA que gera a análise estrutural da rede. São apresentados os invariantes das três modelagens desenvolvidas nas figuras (15), (16) e (17).

```

invariant
{Dist. ab} {Dist. fec} {Planta LIGADA} {Pressão} {Pressão OK}
{Comp OFF} CompOK {Planta LIGADA} {Pressão} {Pressão OK}
{Ent/Sai OK} {Ent/Sai não} {Nível OK} {Nível baixo} {Planta LIGADA}
{Disj. OFF} {Disj. ON} {Planta LIGADA}
{Alim OK} {Alim. não} {Planta LIGADA}

```

**Figura 15 – Invariantes de lugar do processo de antes de ligar a planta**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 15, os invariantes de lugar da modelagem do processo “antes de ligar a planta” são apresentados em cada linha. No caso, o primeiro invariante consiste nos lugares: {Dst. ab}; {Dist. fec}; {Planta LIGADA}; {Pressão}; {Pressão OK}, que correspondem uma tarefa de infraestrutura da pressão necessária para o funcionamento adequado da planta, sendo lugares que se conservam na rede. As demais linhas representam as demais tarefas de infraestrutura.

```

invariant

{Mic desl.} {Mic lig} {Preparação OK} ProcessView {Sinó.Ok}
{Mic desl.} {Mic lig} {Preparação OK} ProcessView {Sint. OK}
{Com OK} {Mic desl.} {Mic lig} {Preparação OK} ProcessView
{CLP OK} {Mic desl.} {Mic lig} {Preparação OK} ProcessView
{Preparação OK} {S.N.ch} {V.TRfab} {V.TRfech} tanq1
{Preparação OK} {S.N.baixo ON} {S.N.baixo OFF} tanq1
{Nível T2 det.} {Nível1} {Nível12} {Nível123} {Nível13} {Nível2} {Nível23} {Nível3} {Preparação OK} {V3 Ab.} {V3 fech} tanq2
{Nível T2 det.} {Nível1} {Nível12} {Nível123} {Nível13} {Nível2} {Nível23} {Nível3} {Preparação OK} {V2 Ab.} {V2 fech} tanq2
{Nível T2 det.} {Nível1} {Nível12} {Nível123} {Nível13} {Nível2} {Nível23} {Nível3} {Preparação OK} {V1 Ab.} {V1 fech} tanq2
{Preparação OK} {V.D.ab} {V.D.fech} tanq2
Bomb1OFF Bomb1ON {Planta LIGADA} {Preparação OK} {S.N.ch} tanq1
{Planta LIGADA} {Preparação OK} {S.N.ch} {Tanque 1} tanq1
Bom2OFF Bomb2ON {Planta LIGADA} {Preparação OK} tanq2
{Planta LIGADA} {Preparação OK} {Tanque 2} tanq2

```

**Figura 16 – Invariantes de lugar do processo de preparar os tanques antes das operações**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 16, os invariantes de lugar da modelagem do processo “preparar os tanques antes das operações” são apresentados em cada linha. No caso, o primeiro invariante consiste nos lugares: {Mic desl.}; {Mic lig}; {ProcessView}; {Sinó.Ok}; {Preparação OK}, que correspondem uma tarefa de habilitação do sinótico do software de supervisão da planta para a visualização dos processos, sendo lugares conservativos na rede. As demais linhas representam as demais tarefas necessárias para iniciar as operações da planta.

invariant
{Flux.det.} {Fluxo de saída Tanque 1} {Fluxo ent. T2} {Já atende} {Sistema finalizado} {T2 misturado} {Tanque 2} {Temp. verif.} {Temperatura T2 OK} {Vaz agua fria} {Vaz.inicial porc} {Vál.dim.} {Válvula T2} {sen.temp.Ba.} {sen.temp.OK} {sen.temp.al.} {val. aum vaz} {vaz. porc det.} {vaz.det.} {vazão det 2}
{Conversor aum.} {Flux.det.}*2 {Resistencias aq.} {Sistema finalizado}*2 {T2 misturado}*2 {Tanque 2}*2 {Temp. verif.}*2 Temperatura*2 {Temperatura OK}*2 {Temperatura T2 OK}*2 {Vaz agua fria}*2 {Vaz.inicial porc}*2 {Vál.dim.} {Válvula T2}*2 {conversor dim.} {sen.temp.Ba.}*2 {sen.temp.OK}*2 {sen.temp.al.}*2 termostato {val. aum vaz} {vaz+temp- ou vaz.man.temp-} {vaz-temp+ouvaz.man.temp+} {vaz. porc det.}*2 {vaz.det.} {vazão det 2}
{Flux.det.} {Fluxo de saída Tanque 1} {Fluxo ent. T2} {Já atende} {Preparação OK} {Sen.temp.B} {Sensor temp A} {Sistema finalizado} {T2 misturado} {Tanque 2} {Temp. verif.} {Temperatura T2 OK} {Vaz agua fria} {Vazão água} {Vál.dim.} {Válvula T2} {sen.temp.Ba.} {sen.temp.OK} {sen.temp.al.} {val. aum vaz} {vaz.det.} {vazão det 2}
{Conversor aum.} {Flux.det.}*2 {Preparação OK}*2 {Resistencias aq.} {Sen.temp.B}*2 {Sensor temp A}*2 {Sistema finalizado}*2 {T2 misturado}*2 {Tanque 2}*2 {Temp. verif.}*2 Temperatura*2 {Temperatura OK}*2 {Temperatura T2 OK}*2 {Vaz agua fria}*2 {Vazão água}*2 {Vál.dim.} {Válvula T2}*2 {conversor dim.} {sen.temp.Ba.}*2 {sen.temp.OK}*2 {sen.temp.al.}*2 termostato {val. aum vaz} {vaz+temp- ou vaz.man.temp-} {vaz-temp+ouvaz.man.temp+} {vaz.det.} {vazão det 2}
{Fluxo de saída Tanque 1} {Fluxo ent. T2} {Já atende} {SP det.} {SP não} {Sen.temp.B} {Sensor temp A} {Sistema finalizado} {T2 misturado} {Tanque 2} {Temp. verif.} {Temperatura T2 OK} {Vaz agua fria} {Vál.dim.} {Válvula T2} {sen.temp.Ba.} {sen.temp.OK} {sen.temp.al.} {val. aum vaz} {vaz.det.} {vazão det 2}
{Conversor aum.} {Resistencias aq.} {SP det.}*2 {SP não}*2 {Sen.temp.B}*2 {Sensor temp A}*2 {Sistema finalizado}*2 {T2 misturado}*2 {Tanque 2}*2 {Temp. verif.}*2 Temperatura*2 {Temperatura OK}*2 {Temperatura T2 OK}*2 {Vaz agua fria}*2 {Vál.dim.} {Válvula T2}*2 {conversor dim.} {sen.temp.Ba.}*2 {sen.temp.OK}*2 {sen.temp.al.}*2 termostato {val. aum vaz} {vaz+temp- ou vaz.man.temp-} {vaz-temp+ouvaz.man.temp+} {vaz.det.} {vazão det 2}

**Figura 17 – Invariantes de lugar do processo de aquecimento e mistura**

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17, os invariantes de lugar da modelagem do processo principal que é de aquecimento e mistura de líquidos são apresentados em blocos separados. Em cada bloco representa cada tarefa possível dos processos, sendo estes lugares considerados parte de um componente conservativo da rede. A determinação de uma tarefa depende das especificações de projeto ou o que deseja executar na planta.

### 5.2.3.2 Invariantes de transição

Os invariantes de transição foram obtidos através da ferramenta TINA que gera a análise estrutural da rede. São apresentados os invariantes das três modelagens desenvolvidas nas figuras (18), (19) e (20).

```

consistent

Conectado Desconectado
{Comp. Desl.} {Comp. Lig.}
Desligado Ligado
{Dist. Ab.} {Dist. Fech.}
Aberto Fechado
Aberto {Comp. Lig.} Conectado {Dist. Fech.} Ligado {V.4bar} {V.N.B} encher mantem {planta ok} reinicio
Aberto {Comp. Lig.} Conectado {Dist. Fech.} Ligado {V.4bar} {V.N.B} ajusta encher {planta ok} reinicio
Aberto {Comp. Lig.} Conectado {Dist. Fech.} Ligado {V.4bar} {V.N.OK} mantem {planta ok} reinicio
Aberto {Comp. Lig.} Conectado {Dist. Fech.} Ligado {V.4bar} {V.N.OK} ajusta {planta ok} reinicio

```

**Figura 18 – Invariantes de transição do processo de antes de ligar a planta**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 18, os invariantes de transição da modelagem do processo “antes de ligar a planta” são apresentados em cada linha. No caso, o primeiro invariante consiste nos lugares: {Conectado} e {Desconectado} que correspondem as transições que formam um componente repetitivo da rede, ou seja, dada uma marcação inicial, disparado estas transições, retorna-se a marcação inicial.

```

consistent

DesB2 LigB2
{D.B.1} {Lig B 1}
{D.mic} {Lig mic}
{Desl. Al.} {Lig. Al}
{abV.D.} {fec V.D}
{Ab Val} {Fec Val}
{Ab.V1} {Aj.V1} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif1 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V1} {Ab.sup.} {Aj.V1} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif1 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V1} {Fech V1}
{Ab.V1} {Ab.V2} {Aj.V12} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif12 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V1} {Ab.V2} {Ab.sup.} {Aj.V12} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif12 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V2} {Aj.V2} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif2 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V2} {Ab.sup.} {Aj.V2} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif2 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V2} {Fech V2}
{Ab.V1} {Ab.V2} {Ab.V3} {Aj.V123} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif123 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V1} {Ab.V2} {Ab.V3} {Ab.sup.} {Aj.V123} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif123 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V2} {Ab.V3} {Aj.V23} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif23 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V2} {Ab.V3} {Ab.sup.} {Aj.V23} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif23 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V1} {Ab.V3} {Aj.V13} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif13 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V1} {Ab.V3} {Ab.sup.} {Aj.V13} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif13 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V3} {Aj.V3} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif3 {ab.proj.} {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V3} {Ab.sup.} {Aj.V3} {Desl. Al.} {Ench T1} {Ench T2} {Fec Val} {Iniciar Operações} {Lig B 1} {Lig mic} LigB2 {T1 ok} {Ver com.} Verif3 {abV.D.} {preparacao tanque 1 e tanque 2 } reinicio
{Ab.V3} {Fech V3}

```

**Figura 19 – Invariantes de transição do processo de preparar os tanques antes das operações**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 19, os invariantes de transição da modelagem do processo “preparar os tanques antes das operações” também são apresentados em cada linha, que correspondem a mesmo propósito da análise anterior.

consistent
{Ap.SP} {det. SP}
{apagar porc} {det. porc}
{Ajustar val} {Dim. vaz} Misturar {Ver. temp. Ba}
{Ajustar val} {Au. vaz} Misturar {Ver. temp. Al}
{Ajustar val} {Controlar vazão} {Desc. perdas} Finalizar {Iniciar controle de aquecimento} {Iniciar proc. mist} {Man. vaz} Misturar Reiniciar {det. SP} {man.vaz.inicial} {ver. tempe. OK} {ver.tempOK}
{Ajustar val} {Controlar vazão} {Desc. perdas} Finalizar {Iniciar controle de aquecimento} {Iniciar proc. mist} {Man. vaz} Misturar Reiniciar {Ver. temp. OK} {Ver.aut.temp.A} {Ver.temp.2} {aum. vazão} {cont. vaz e aq temp. A} {det. SP} {dim. temp.} inibir {ver. tempe. OK}
{Ajustar val} {Cont.vaz.e.aq.temp.B} {Controlar vazão} {Desc. perdas} Finalizar {Iniciar controle de aquecimento} {Iniciar proc. mist} {Man. vaz} Misturar Reiniciar {Ver. temp. OK} {Ver.aut.temp.B} {Ver.temp1} {aum.temp.} {aume.energia} {det. SP} {dim.vaz.} {ver. tempe. OK}
{Ajustar val} {Controlar vazão} {Desc. perdas} {Det. vaz porc} Finalizar {Iniciar controle de aquecimento} {Iniciar proc. mist} {Man. vaz} {Mant. vaz det.} Misturar Reiniciar {Ver. temp. OK} {Ver.temp} {Ver.temp1} aquecer {aum.temp.} {aume.energia} {det. SP} {det. porc} {ver. tempe. OK}
{Ajustar val} {Controlar vazão} {Desc. perdas} {Det. vaz porc} Finalizar {Iniciar controle de aquecimento} {Iniciar proc. mist} {Man. vaz} Misturar Reiniciar {Ver. temp. OK} {Ver.temp} {Ver.temp.2} {det. SP} {det. porc} {dim. temp.} esfriar inibir {manter a vazão} {ver. tempe. OK}

**Figura 20 – Invariantes de transição do processo de aquecimento e mistura**

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 20, os invariantes de transição da modelagem do processo “preparar os tanques antes das operações” são apresentados por blocos separados, que correspondem a mesmo propósito da análise anterior.



## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um estudo sobre o sistema a eventos discretos da planta industrial didática SMAR, levantando todas as tomadas de decisões, desde processos antecedentes às operações e processos principais e a abstração necessária para considerar operações contínuas em discretas, com principal intuito de analisar o comportamento lógico do sistema e a estrutura da rede modelada.

Através deste estudo, desenvolveu-se a modelagem de sistemas a eventos discretos com Redes de Petri com os objetivos de gerar o formalismo matemático, responsável por trazer segurança do funcionamento, analisar acessibilidades do modelo e permitir as simulações, que são vantajosas quanto a inferências no sistema, caso necessite alguma alteração, criação ou experimentos futuros.

A modelagem foi desenvolvida na ferramenta TINA que permite a simulação e gera análises da modelagem, essenciais para validar os objetivos propostos.

A modelagem foi dividida em quatro processos de operação, sendo que dois deles são requisitos para iniciar os processos principais de aquecimento e de mistura de líquidos. Os processos principais foram modelados juntos, devido a dependência e interação entre eles, resultando em três modelagens: modelagem do processo antes de ligar a planta, modelagem do processo de preparar os tanques antes das operações, e modelagem principal que contém o processo de aquecimento e processo de mistura de líquidos.

Os modelos desenvolvidos, que representam o sistema da planta didática por tarefas de projetos realizados em estudos de controle e aplicações das atividades da planta, foram analisados quanto a alcançabilidade da rede e a estrutura.

Os resultados obtidos das análises foram que as redes são vivas, reversíveis e limitadas, e os invariantes de lugar e transição foram obtidos correspondendo as tarefas possíveis de projetos e verificando a possibilidade de retornar às marcações iniciais, incluindo as tomadas de decisões. Pela ferramenta TINA, que gera estas análises estruturais e de alcançabilidade, foi possível evidenciar que o sistema foi bem modelado, e está operacional, servindo de informação em trabalhos futuros relacionados.

Como a estrutura da rede foi desenvolvida, é possível determinar a matriz de incidência do sistema, como explicado na seção 2.2.7. Com a matriz de incidência e a equação fundamental (seção 2.2.8), para trabalhos futuros, sugere-se que realize a

comunicação da modelagem do sistema com a planta em tempo real, pois esta, possui um protocolo de comunicação via MatLab, através de uma interface para ser criada objetivando esta comunicação. Assim, será possível visualizar os estados e transições acontecerem conforme a planta esteja operando, sendo esta, uma contribuição relevante para demonstrações do sistema a eventos discretos da planta industrial didática.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTULUCCI, Cristiano S. **Sistema Integrado de Produção: Saiba Como Ele Impacta na indústria**. Citisystems, Mercado Industrial, produção industrial, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.citisystems.com.br/sistema-integrado-producao-automacao-industrial/>> Acesso em: 21 out. 2016.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**, 2 ed. New York, NY: Springer. 2008.

CARDOSO, J.; VALETTE, R. **Redes de Petri**. Ed. da UFSC, Florianópolis.1997.

CURY, R. E. J. **Teoria de Controle Supervisório de Sistemas a Eventos Discretos**. Mini-Curso V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela, RS. 2001.

MARÇAL, Rafael M. P.; CARMO, Marlon J. do; OLIVEIRA, Ângelo R. **Rede de Petri no controle de nível de uma planta HART**. In: DINCON, 10ª Conferência brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, Minas Gerais, 2011.

MARRANGHELLO, Norian. **Redes de Petri: Propriedades e Análise**. Apostila, DCCE / IBILCE / UNESP, 2005.

MURATA, T., **State Equation, Contrallability, and Maximal of Petri Nets**, IEEE Trans. On Automatic Control, 1977.

OLIVEIRA, Layon M. de; TEIXEIRA, Daniel D.; OLIVEIRA, Angelo R. de; CARMO, Marlon J. do; ARAÚJO, Lindolpho O.de J. **Utilização de uma planta didática SMAR para complementação do ensino de engenharia de controle e automação**. In: XL CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE). Belém – PA, 2012.

PLÍNIO. C. **Engenharia de Automação Industrial**. Editora, LTC, 2001.

RIBEIRO, Alexandre da S.; LEPIKSON, Herman; LIMA II Eduardo J. **Modelagem e especificação de controle de sistema flexíveis de manufatura utilizando Redes de Petri de alto nível**. In: VI Congresso nacional de engenharia mecânica. Paraíba, 2010.

SILVA, L. R. B.; ENDO, W.; LISBÔA, A. R. B. S. **Expectativas da utilização de uma planta didática industrial como objeto de aprendizagem em um curso de graduação em engenharia**. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE). Blumenau-SC, 2011. p. 10.

SILVA, L. R. B. **ESTUDO APLICADO DE TOPOLOGIAS DE CONTROLE**

**DE PROCESSOS UTILIZANDO UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL.** 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2011b.

SILVEIRA, P.R.; SANTOS, W.E. **Automação e controle discreto.** São Paulo: Érica, 2008.

SMAR. PD3-P – **Manual de Instruções, Operação e Manutenção - Treinamento.** v. 3, 2012.