

DIEGO RAPHAEL DINIZ TURBINO  
FÁBIO VINICIUS AMORIM

**DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE DE UM  
SISTEMA DE FABRICAÇÃO DE RAÇÃO**

São Paulo  
2009

DIEGO RAPHAEL DINIZ TURBINO  
FÁBIO VINICIUS AMORIM

**DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE DE UM SISTEMA  
DE FABRICAÇÃO DE RAÇÃO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo relacionado à  
disciplina PMR2550 – Projeto de Conclusão de  
Curso II.

Curso de Graduação: Engenharia Mecatrônica

Orientador:

Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho

São Paulo  
2009

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Turbino, Diego Raphael Diniz**

**Desenvolvimento do programa de controle de um sistema de  
fabricação de ração / D.R.D. Turbino, F.V. Amorim. -- São Paulo,  
2009.**

**70 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de  
Sistemas Mecânicos.**

**1. Automação industrial 2. Redes de Petri 3. Controle (Teoria  
de sistemas e controle) I. Amorim, Fabio Vinicius II. Universida-  
de de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenha-  
ria Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.**

Dedico esse trabalho aos meus queridos pais, Célio e Lilian, os quais eu amo muito e que me apoiaram de todas as maneiras possíveis nessa etapa da minha vida.

*Diego Raphael Diniz Turbino*

Aos meus avós, Altivo e Nair, e aos meus pais, Nilo e Fátima, que desde os meus primeiros dias de vida têm me dado suporte, força e têm aguardado por esse momento. E aos meus irmãos Felipe e Fabiana.

*Fábio Vinicius Amorim*

## Agradecimentos

Ao Deus Altíssimo, o Senhor das nossas almas que nos permitiu mais essa etapa de nossas vidas e sem a graça de Quem não somos nenhum de nós, capazes nem ao menos de respirar.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Diolino José Santos Filho pela sua orientação, ajuda, compreensão, paciência, conselhos, exemplo e amizade.

Ao proprietário da fábrica do estudo de caso pela sua imensa colaboração e a todos os funcionários que nos ajudaram especialmente ao gerente geral, os quais não citaremos os nomes para preservar o sigilo das informações da fábrica.

A todos os colegas do grupo de pesquisa pelos muitos conselhos, ensinamentos e pelas horas de dedicação em nos passar um pouco dos seus vastos conhecimento e experiência, em especial ao José, ao Reinaldo Esquilante e ao Marcosiris.

Às nossas famílias e amigos, pelo constante apoio, amor e carinho que nos é dado dia após dia e faz os nossos dias mais doces, em especial aos nossos pais e irmãos, bem como aos nossos pais e irmãos da fé, todos esses a quem amamos com as nossas víceras.

A todos os nossos colegas do dia-a-dia da universidade, que são os alunos, funcionários e professores que compartilham conosco a batalha do dia-a-dia, em especial aos que fizeram grande diferença, facilitando os nossos caminhos, nos levando ao caminho das pedras e colaborando muito além das suas obrigações oficiais e éticas, com menção aos amigos-irmãos Marcos Matsutani e Richard, e aos grandes amigos Prof. Dr. José Aquiles Grimonini, Cassio Neves e Prof. Dr. Buiochi.

A todos os que foram citados a nossa eterna gratidão, amor e carinho.

"A ciência sem fé é loucura, e a fé sem ciência é fanatismo"

*Martinho Lutero*

## RESUMO

O trabalho consiste na criação de um programa de controle para integração e automação de processos industriais em fábricas de ração. Estas fábricas demandam a implantação de diversos níveis de automação, envolvendo a integração de processos, que vão desde o monitoramento do nível dos silos de pesagem até os silos de moagem. Estes processos já sofreram algum tipo de automação que deve ser revista em virtude do avanço tecnológico ocorrido na última década. Na fábrica de estudo, observa-se que, devido à falta de manutenção adequada e ao desgaste decorrente do uso e do tempo, vários processos passaram a ser manuais. Atualmente, para se adequar aos padrões de exigência do mercado internacional, existe urgência em aprimorar-se a automação destes sistemas para garantir qualidade, uniformidade do produto final e a diminuição dos custos de produção. A proposta do programa de controle visa integrar os seguintes processos: o controle dos silos de pesagem, a pesagem, a mistura, o controle das caixas de expansão, o controle dos elevadores de canecas, o controle das roscas transportadoras e o controle dos silos de moagem. Para cada caso de automação, a integração está sujeita à exclusão ou inclusão de processos de acordo com a identificação de possíveis melhorias nos processos de fabricação.

Palavras-chave: automação industrial, integração de processos, controle programável, redes de Petri, SFC.

## ABSTRACT

This work consists in creating a control program for integration and automation of industrial processes in feed mills. These plants require the deployment of different levels of automation, involving the integration of processes, ranging from the level monitoring of silos weighing up the silos of grinding. These processes have already suffered some kind of automation that should be reviewed because of technological advances during the last decade. In the case study, it is observed that due to lack of proper maintenance and due to the wear out by use and time, several processes have to be manual. Currently, to fit the standards required in international market, it is urgent to improve the automation of these systems to ensure quality and uniformity of the final product and reducing production costs. The proposed control program aims to integrate the following processes: control of the silo weighing, weighing, mixer, control of expansion boxes, control of bucket elevators, control of screw conveyors and control of silos grinding. For each case of automation, the system integration can deal with exclusion or inclusion of processes in accordance with the identification of possible improvements in production control.

Keywords: industrial automation, process integration, programmable control, Petri nets, SFC.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE TABELAS .....	11
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1. Contextualização de Sistemas de Fabricação de Ração (SFR) .....	12
1.2. Problemas Encontrados.....	12
1.3. Objetivo.....	13
1.4. Organização do Trabalho .....	13
<b>2. MODELAGEM DE SISTEMAS PRODUTIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1. Sistema a Eventos Discretos (SED) .....	15
2.2. Sistema de Fabricação de Ração e SEDs.....	16
2.3. Modelo Estrutural de um SED.....	16
<b>3. SISTEMÁTICA PARA DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE CONTROLE.....</b>	<b>17</b>
3.1. Parte Operativa x Parte de Controle.....	17
3.2. Sistemática para Modelagem da Parte de Controle.....	19
3.2.1. Production Flow Schema (PFS).....	19
3.2.2. Redes de Petri (RdP) .....	22
3.2.3. Refinamento Sucessivo .....	25
3.2.4. Intertravamentos .....	26
3.3. Validação dos Modelos em RdP .....	27
3.4. Mapeamento Isomórfico .....	27
3.4.1. Linguagem de Programação SFC.....	27
3.4.2. Mapeamento de RdP em SFC .....	28
<b>4. ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>31</b>
4.1. Descrição do SFR.....	31
4.2. Modelo Esquemático .....	38
4.3. Modelo Estrutural.....	39
4.3.1. Caso de Uso .....	39
4.3.2. Dispositivos .....	41
4.4.3. Painel.....	43
4.3.3. Arquitetura do Sistema de Controle .....	43
4.4. Construção do Algoritmo .....	45
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento de uma variável de um SED .....	15
Figura 2 : Diagrama conceitual básico do sistema de controle de SED.....	16
Figura 3 : Representação das interconexões de um sistema .....	17
Figura 4: Decomposição de um sistema em PC-PO.....	18
Figura 5: Exemplo de um modelo em PFS com a identificação de seus elementos estruturais .....	20
Figura 6: a) Início de atividade devido a ocorrência de 2 eventos. b) Término de atividade devido a ocorrência de 2 eventos.....	21
Figura 7: Programa SFC.....	28
Figura 8: Diagrama Esquemático do Objeto de Controle.....	33
Figura 9: Sugestão de futuro layout da fábrica. ....	40
Figura 10: Caso de uso.....	41
Figura 11: Painel de comando. ....	43
Figura 12: Arquitetura do sistema de controle.....	44
Figura 13: PFS do sistema a ser abordado na fábrica de ração. ....	45
Figura 14: PFS detalhado do futuro processo.....	45
Figura 15: Detalhamento dos intertravamentos. ....	46
Figura 16: Detalhamento dos intertravamentos. ....	47
Figura 17: Rede de Petri da fabricação de ração. ....	50
Figura 18: SFC do sistema.....	51
Figura 19: SFC do sistema.....	52
Figura 20: SFC do sistema.....	53
Figura A 1 - Representação gráfica de uma rede de Petri.....	59
Figura A 2 - Exemplo de rede de Petri pura.....	61
Figura A 3 -Efeito de concorrência de uma ação .....	62
Figura A 4 -Exemplo de situação de conflito .....	62
Figura A 5 - Exemplo de situação de concorrência.....	63
Figura A 6 - Exemplo de situação de confusão.....	64
Figura B 1 - Etapas.....	65
Figura B 2 - Receptividade nas transições.....	66
Figura B 3 - Representação das ações junto aos steps.....	67
Figura B 4 - Representação de atuações em função do tempo.....	67
Figura B 5 - Representação de início de sequências em paralelo.....	68
Figura B 6 - Representação de fim de sequências em paralelo .....	68
Figura B 7 - Representação de início de sequências exclusivas .....	69
Figura B 8 - Representação de fim de sequências exclusivas.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dispositivos usados em controle de sistemas de produção.....	17
Tabela 2: Tipos de intertravamentos.....	26
Tabela 3: Dados de equipamentos da instalação.....	34
Tabela 4: Lista de Válvulas Solenóides (atuadores).....	35
Tabela 5: Tempos dos processos de pesagem, mistura, carregamentos e descarregamentos.....	37
Tabela 6: Tabela de pesagem e erros.....	37

# 1. INTRODUÇÃO

## **1.1. Contextualização de Sistemas de Fabricação de Ração (SFR)**

Os processos de fabricação de ração são divididos da seguinte maneira: recebimento de matéria prima, estocagem em silos, transferência para silos de pesagem, pesagem, quando os diferentes insumos são colocados numa caçamba na medida certa definida por uma fórmula específica para cada produto, mistura quando todos os materiais são misturados de forma a uniformizar a receita, moagem, quando todos os insumos são convertidos em um pó fino, extrusão, quando a ração é separada em grãos de vários formatos diferentes dependendo do produto, secagem, para retirar a umidade do produto proveniente da secagem, recobrimento (somente para Petfood), feito com óleo, gordura, palactantes e aromatizantes, resfriamento e ensaque.

## **1.2. Problemas Encontrados**

Atualmente, os fabricantes de ração estão se vendo obrigados a investirem nos seus processos produtivos. Tanto porque o mercado pet está em franco crescimento, e é necessário aumentar a capacidade produtiva e a produtividade, com os custos mais baixos possíveis, de forma a aumentar a competitividade, mediante ao aumento da concorrência. Como a tendência do mercado vai além das fronteiras nacionais, a necessidade de aumento da competitividade dos produtos para entrar no mercado internacional.

Visando atender a essas demandas da melhor forma possível e aproveitar as oportunidades atuais para os produtores brasileiros de ração, a Associação Nacional de Fabricantes de Alimentos para Animais de Estimação (ANFALPET) criou o Programa Integrado de Qualidade (PIQ PET), que é um programa de certificação de qualidade de alimentos para animais de estimação, com selos para vários níveis de qualidade. Entre as exigências do PIQ PET estão os materiais

utilizados nos equipamentos, a documentação dos dados de fabricação de todos os lotes e a freqüência de amostragem e testes dos produtos.

Diante desta conjuntura, além de reformas estruturais e troca de equipamentos, máquinas, ferramentas, fórmulas e insumos, um dos grandes focos dos fabricantes tem sido a aplicação de automação e integração no SFR. Isso porque, além de permitir a diminuição de custos de fabricação relacionados aos recursos humanos, a automação promete facilitar a documentação da fabricação, bem como a uniformização dos produtos e o aumento da produtividade dos equipamentos.

### ***1.3. Objetivo***

O objetivo deste trabalho é sugerir a obtenção de um programa de controle de um SFR através da aplicação de várias técnicas de modelagem, mapeamento, simulação e validação.

Inicialmente pretende-se estabelecer um modelo estrutural dos dispositivos do SFR e seu controle. A partir do mesmo, se aplicará uma metodologia para descrição do algoritmo de controle, tendo em vista o processo produtivo em questão, os intertravamentos do sistema e a definição da parte de controle e da parte operativa do sistema. Isto posto, com a aplicação de técnicas de análise, utilizando Redes de Petri (RdP) criar-se-á o algoritmo de controle de um SFR. A partir do mesmo, tendo o modelo validado, aplicaremos mapeamento isomórfico para, a partir da RdP, gerarmos o programa de controle em Sequential Flow Chart (SFC). O qual será simulado em um software comercial adequado.

### ***1.4. Organização do Trabalho***

No capítulo 2 deste trabalho será abordado o conceito de sistemas de eventos discreto (SED) e a descrição para um sistema de produção de ração.

No capítulo 3 será vista uma sistemática para descrição do algoritmo de controle que estabelece uma distinção da parte operativa e da parte de controle do sistema e uma sistemática para modelagem da parte de controle abordando

Production flow Schema (PFS), refinamento sucessivo do modelo em PFS e o mapeamento de rede de Petri (RdP) para Sequential Function Chart (SFC) .

No capítulo 4 apresenta-se o estudo de caso que abordará a descrição do SFR, o modelo estrutural, a construção do algoritmo e a implementação do programa em STEP 7.

No capítulo 5 apresenta-se as observações finais deste trabalho e propostas de trabalhos futuros.

## 2. MODELAGEM DE SISTEMAS PRODUTIVOS

### 2.1. Sistema a Eventos Discretos (SED)

Um Sistema a Eventos Discretos (SED) é um sistema em que as variáveis de estado variam bruscamente em instantes determinados e tal que os valores das variáveis nos estados seguintes podem ser obtidos por meio de cálculos, diretamente a partir dos valores precedentes, não sendo necessário considerar o intervalo de tempo entre os instantes analisados (VALLETE,1997). A figura 1 apresenta um gráfico ilustrativo do comportamento de uma variável de um SED ao longo do tempo.

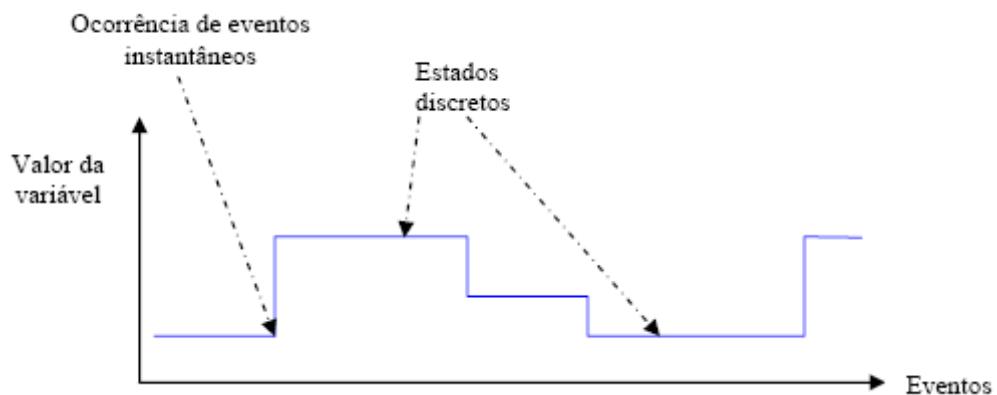


Figura 1: Comportamento de uma variável de um SED.

Outra definição para um SED, estabelecida por RAMADGE & WONHAM (1989), caracteriza este tipo de sistema como sendo construído e concebido pelo homem e cuja dinâmica é regida pela ocorrência de eventos discretos a intervalos em geral irregulares e desconhecidos.

Dentre algumas particularidades de SEDs, GUSTIN (1999) cita: sincronização, assincronismo, concorrência, causalidade, conflito entre processos e compartilhamento de recursos.

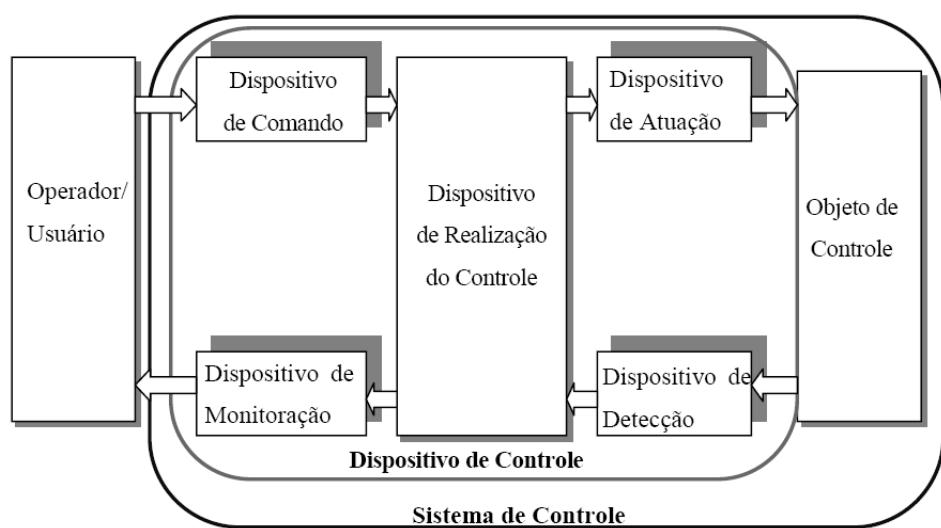
## **2.2. Sistema de Fabricação de Ração e SEDs**

Como vimos, a maior parte do SFR é composta de equipamentos de transformação e transporte, movidos por atuadores como motores elétricos e válvulas que não necessitam de controle de velocidade, de posições intermediárias, etc, uma vez que estas malhas de controle local encontram-se embarcadas nos dispositivos e equipamentos. Apesar de existirem alguns processos com controle de variáveis contínuas como a pesagem, a extrusão e o ensaque, esses processos, podem ser controlados localmente, de tal forma que possam ser vistos como elementos de um sistema dirigido por eventos discretos.

Portanto, o SFR pode ser representado com segurança e boa precisão por meio de um modelo de SED, permitindo algoritmos de controle relativamente simples para a integração de todo o processo produtivo.

## **2.3. Modelo Estrutural de um SED**

Considerado como um sistema a eventos discretos, um sistema produtivo pode ser descomposto para seu estudo conforme com o esquema apresentado na figura 2 (MIYAGI, 1996). Segundo este esquema, os principais dispositivos utilizados no controle de sistemas produtivos podem classificar-se da seguinte forma como mostra a tabela 1.



**Figura 2 : Diagrama conceitual básico do sistema de controle de SED.**

**Tabela 1: Dispositivos usados em controle de sistemas de produção.**

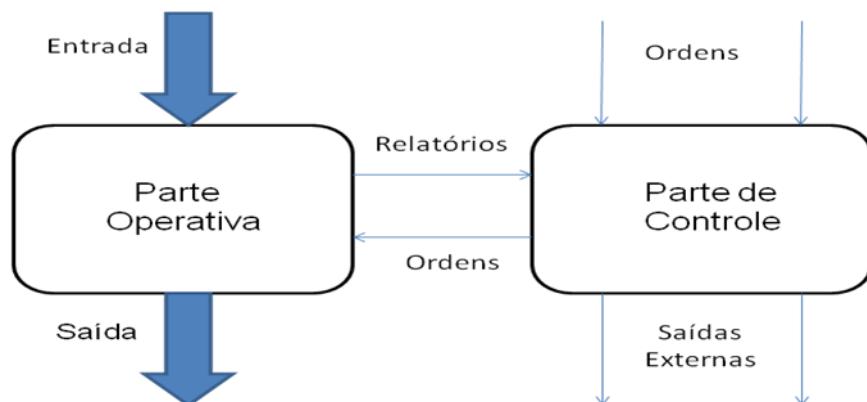
CLASSIFICAÇÃO	DISPOSITIVOS
Dispositivo de Comando	Botoeiras
Dispositivo de Atuação	Válvulas , contactores, motores
Dispositivo de Detecção	Chaves-limites, tacômetros, sensores fotoelétricos
Dispositivo de Realização	Computador, CPs (Controladores Programáveis)
Dispositivo de Monitoração	Lâmpadas sinalizadoras, buzinas, LEDs

### 3. SISTEMÁTICA PARA DESCRIÇÃO DO ALGORITMO DE CONTROLE

#### 3.1. *Parte Operativa x Parte de Controle*

Um sistema pode ser representado através das interconexões dos seguintes subsistemas como mostra a figura 3 (SILVA, 1985).

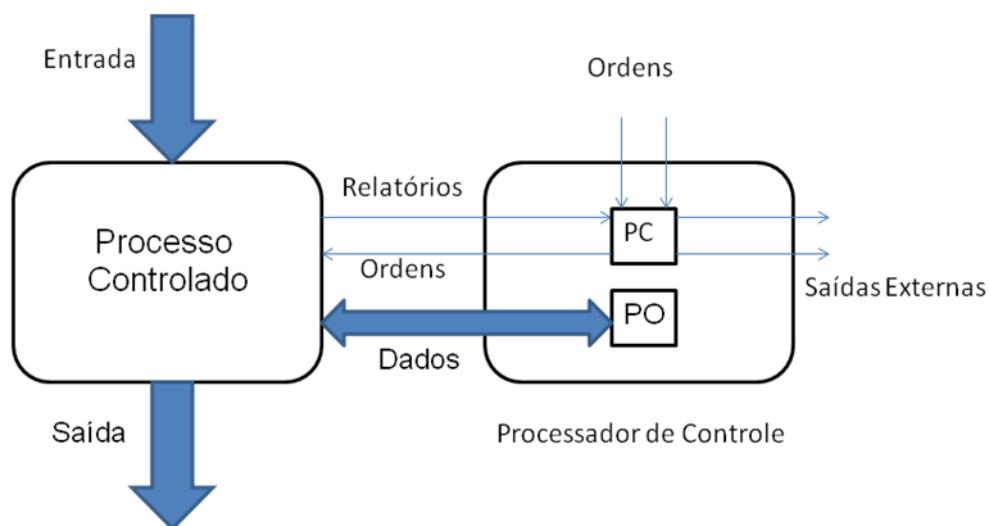
- a) Parte operativa (PO)
- b) Parte de controle (PC)



**Figura 3 : Representação das interconexões de um sistema.**

Uma separação PO-PC em um sistema que não faz mais do que estabelecer uma distinção entre um subsistema de execução e um sistema de orientação/controle. O PO transmite para o PC relatório sobre a sua situação e o PC, em função dessa informação, emite ordens ao PO (SILVA, 1985).

A separação PC-PO é um conceito clássico que visa facilitar a descrição usando o aforismo *dividir para conquistar*. Na verdade, a decodificação por partes simplifica a construção do modelo total. Tomando como exemplo um sistema máquina-ferramenta com controle numérico, é possível considerar como PC todo controle numérico. Obviamente, esse automatismo numérico por sua vez pode ser considerado como um sistema que pode ser decomposto em PC-PO como na figura 4.



**Figura 4: Decomposição de um sistema em PC-PO.**

Na descrição de um sistema, pode-se aplicar decomposições sucessivas PC-PO que permitem passar de certa descrição para uma mais detalhada. A metodologia de descrição chamada de refinamentos sucessivos consiste em reaplicar os passos seguintes quantas vezes for necessário:

- Definir uma nova separação PC-PO sobre o PO original, quebrando-se as ações em outras mais elementares.
- Levar ao PC o seqüenciamento de operações em que as ações foram decompostos anteriormente.

Em resumo, a separação facilita a descrição. Isto é evidente quando se considera automatismos numéricos (que são computadores digitais programáveis), como existem subsistemas típicos que fazem parte da PO (somadores, contadores, etc.) (SILVA, 1985).

### **3.2. Sistemática para Modelagem da Parte de Controle**

#### **3.2.1. Production Flow Schema (PFS)**

O PFS (Production Flow Schema) (HASEGAWA et al., 1988; MIYAGI, 1988; SILVA & MIYAGI, 1996), é uma classe de rede canal-agência (REISIG 1992) devidamente interpretada e constitui uma técnica para representar o nível conceitual mais alto de abstração do sistema sem detalhamento do comportamento dinâmico.

O PFS caracteriza um sistema a partir de seus elementos ativos e fluxo de materiais e informações dentro de um processo. Esta abordagem baseia-se no princípio de que um sistema é composto por elementos ativos que realizam transformações e elementos passivos que realizam a distribuição de itens (materiais ou informações), existindo, portanto uma inter-relação entre estes elementos para a realização efetiva dos fluxos presentes no sistema. Deve-se salientar que o PFS, distintamente das RdP não possui o conceito de marcação, pois é um modelo conceitual do sistema sem descrição de sua dinâmica.

##### **3.2.1.1. Elementos Estruturais do PFS**

Os elementos estruturais de um PFS estão representados na figura 5.

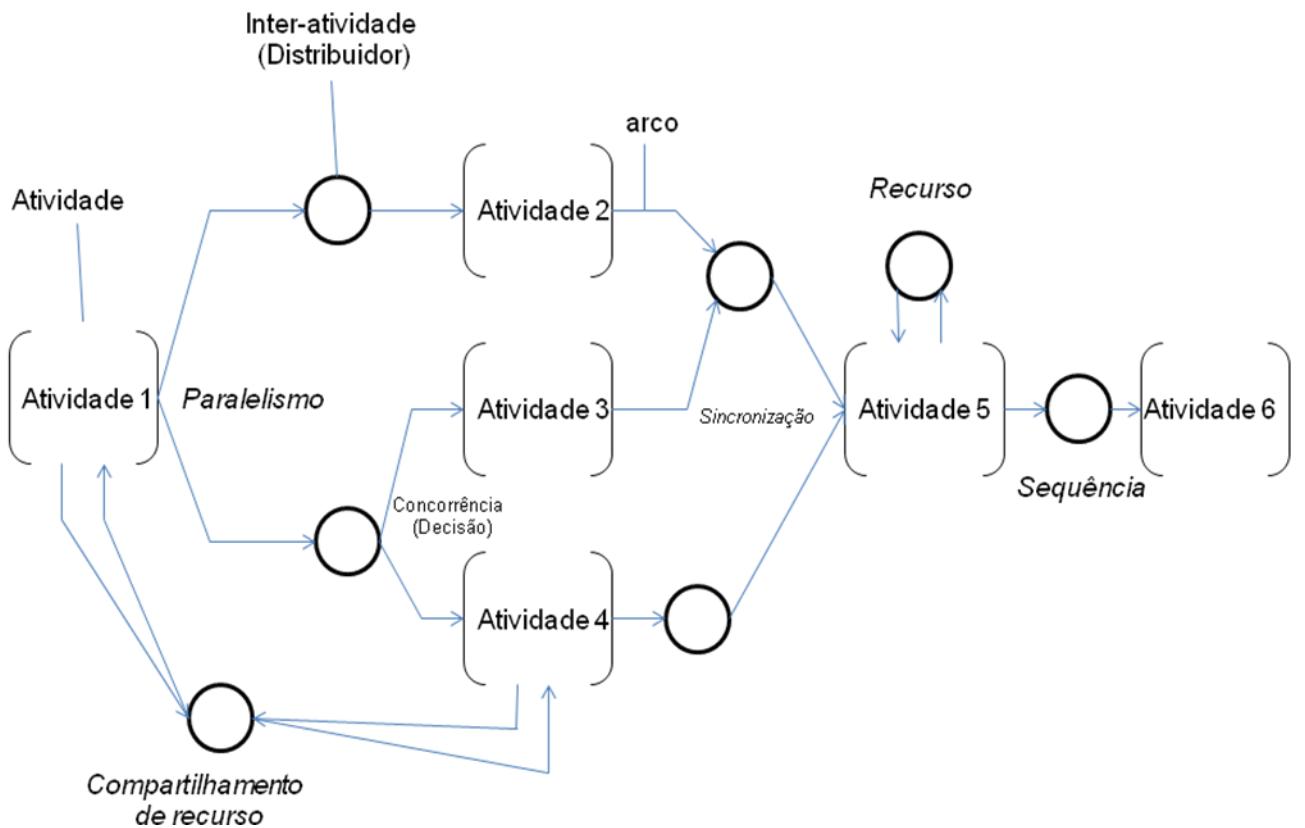
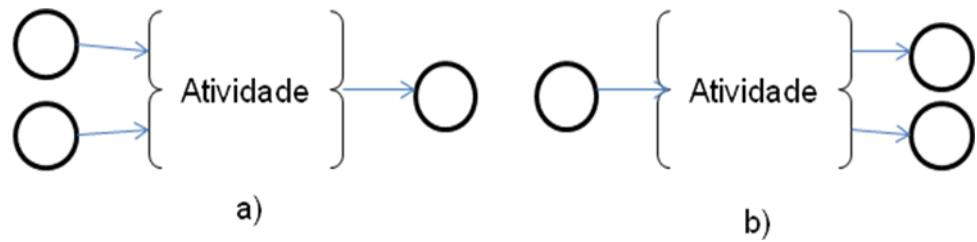


Figura 5: Exemplo de um modelo em PFS com a identificação de seus elementos estruturais.

**ATIVIDADE:** representa um componente ativo do sistema capaz de realizar transformações, isto é, ações. As *atividades* podem agregar uma ou mais operações (não explícitas no presente nível de abstração). Graficamente, corresponde a um macro-elemento delimitado por colchetes e com inscrições em linguagem natural ou formal para especificá-lo. Cada *atividade* pode ser refinada em sub-atividades com as suas respectivas interações.

Uma *atividade* pode ser iniciada ou finalizada pela ocorrência de um ou mais eventos exclusivos (SUGISAWA, 1998). Sua representação é apresentada na figura 6.



**Figura 6:** a) Início de atividade devido a ocorrência de 2 eventos.  
b) Término de atividade devido a ocorrência de 2 eventos.

**INTER-ATIVIDADE OU DISTRIBUIDOR:** representa um componente passivo, capaz de armazenar, permanecer em determinados estados ou tornar os itens visíveis. É indicado graficamente por uma circunferência. Uma *inter-atividade* deve existir sempre entre duas *atividades* que estejam relacionadas.

**ARCO:** conectam *atividades* a *inter-atividades* e vice-versa representando o fluxo de materiais e/ou informações. Os arcos indicam uma relação lógica, entre os componentes. Se a conexão se faz pela parte externa da *atividade*, indica um fluxo principal de itens no sistema e se é realizada pela parte interna, indica um fluxo secundário (este fluxo não é obrigatório). Graficamente corresponde a uma seta.

Deve-se observar que elementos de um mesmo tipo não podem ser conectados diretamente uns aos outros. Além disso, cada um dos componentes recebe inscrições em linguagem natural, indicando sua interpretação específica para o modelo elaborado.

### 3.2.1.2. Representação de Características de SEDs em PFS

Neste nível de descrição, algumas características de SEDs, que podem ser observadas nos modelos em PFS são:

**SEQÜÊNCIA:** indica a relações de precedência entre as *atividades*, onde o início de uma só pode ocorrer ao término da anterior.

**SINCRONIZAÇÃO:** caso no qual mais de um elemento *inter-atividade* se encontra à entrada de um bloco *atividade*. Refere-se à condição de que esta *atividade* só tem início se os elementos *inter-atividade* estiverem em condições próprias para iniciar a *atividades*.

**PARALELISMO:** Quando mais de um elemento *inter-atividade* se encontraram à saída de um bloco *atividade*, assim ocorre paralelismo entre as

*atividades* na seqüência desses elementos *inter-atividade*.

**CONCORRÊNCIA:** Situação em que existem duas ou mais *atividades* com fluxos derivados (decisão) ou convergentes a um único elemento *inter-atividade*. Representa o fato que os elementos de um fluxo podem ter mais de uma opção quanto à próxima *atividade*; sendo preciso, neste caso, que um processo de decisão deva ser associado à seleção de uma das possibilidades.

**COMPARTILHAMENTO DE RECURSOS:** é um caso particular de decisão, onde várias *atividades* podem vir a solicitar, simultaneamente, o mesmo recurso.

O PFS representa uma funcionalidade específica de um sistema, enfocando uma forma de organização de *atividades* (ou seja, características de seqüência, sincronização, decisão, etc.) e recursos alocados para executar estas. Assim, os diversos modos como as *atividades* são coordenadas e os recursos são atribuídos às *atividades* determinam diferentes funcionalidades.

Além das estruturas apresentadas (paralelismo, concorrência, etc.), definidas pelo fluxo principal, os fluxos secundários podem a sua vez definir relações como (Liu, 1993): a comunicação assíncrona que pode representar troca de informações entre *atividades*, comunicação síncrona, onde as *atividades* são sincronizadas através de outra *atividade* e chamadas de procedimentos externos, na qual é representada a utilização de um mesmo processo (exemplo um gerenciador de banco de dados) por várias *atividades*.

### **3.2.2. Redes de Petri (RdP)**

O conceito de RdP foi introduzido por Carl Adam Petri em sua tese de doutorado (1962), como ferramenta para descrever relações entre condições e eventos no estudo de protocolos de comunicação entre componentes assíncronos. Embora ocorresse uma ampla divulgação acadêmica ao longo de três décadas, o seu potencial só foi reconhecido na metade da década de oitenta, onde esta teoria foi usada para implementações práticas nas áreas de informática e manufatura devido à disponibilidade de novos recursos de “hardware” e “software”.

A RdP é uma ferramenta matemática e gráfica que oferece um ambiente uniforme para modelagem, análise e projeto de sistemas a eventos discretos

(ZURAWKI & ZHOU, 1994). Sua aplicação tem se estendido a uma grande quantidade e variedade de sistemas. Os principais sistemas onde é aplicada esta técnica são: sistemas de comunicações, sistemas de software, sistemas de processamento de informação, além das aplicações em modelagem, simulação e seqüenciação de sistemas flexíveis de manufatura. Em geral, utiliza-se as RdP e sua extensões para a modelagem gráfica da estrutura do sistema e de seu comportamento dinâmico.

Em (HASEGAWA, 1996) destacam-se as seguintes características e vantagens desta técnica:

- Representa a dinâmica e a estrutura do sistema segundo o nível de detalhamento desejado.
- Identificam estados e ações de modo claro e explícito, facilitando com isto a monitoração do sistema em tempo real.
- Tem a capacidade para representar de forma natural as características dos SED (sincronização, assincronismo, concorrência, causalidade, conflito, compartilhamento de recursos, etc.).
- Associa elementos de diferentes significados numa mesma representação, ou segundo o propósito do modelo (avaliação de desempenho, implementação do controle, etc).
- Oferece um formalismo gráfico que permite a documentação e monitoração do sistema, facilitando assim o diálogo entre o projetista e as pessoas que participam no processo de projeto ou de análise do comportamento do sistema (projetista, operador, gerente, etc.).
- Constitui-se como uma teoria muito bem fundamentada para a verificação de propriedades qualitativas.
- Possui uma semântica formal e precisa que permite que o mesmo modelo possa ser utilizado tanto para a análise de propriedades comportamentais (análise quantitativa e/ou qualitativa) e avaliação do desempenho, assim como para a construção de simuladores a eventos discretos e controladores (para implementar ou gerar códigos para controle de sistemas). Além de servir para verificar comportamentos indesejáveis como bloqueio, limitação, etc.
- Incorpora conceitos de modelagem do tipo refinamento (“*top down*”) e do tipo

composição modular (“*bottom up*”) através de técnicas como: modularização, reutilização, refinamento, etc.

Como uma ferramenta matemática, um modelo em rede de Petri pode ser descrito por um sistema de equações lineares, ou outros modelos matemáticos que refletem o comportamento do sistema (ZURAWSKY & ZHOU, 1994), o qual possibilita a análise formal do mesmo. Esta característica permite realizar a verificação formal das propriedades comportamentais do sistema.

As abordagens relacionadas com RdP encontradas na literatura podem ser organizadas em três classes fundamentais:

RdP básicas ou ordinárias: se constitui em um modelo elementar adequado para visualizar comportamentos que envolvem paralelismo, sincronização e compartilhamento de recursos. Este é o modelo básico de rede que permite extensões segundo a aplicação para a qual se utiliza.

Reduções de RdP ordinárias: são descrições simplificadas que procuram sintetizar a apresentação gráfica dos modelos, mas que ainda podem ser representadas adequadamente por redes de Petri ordinárias. Entre estas estão: RdP generalizadas, RdP de capacidade finita, RdP coloridas.

Extensões das RdP ordinárias: correspondem a modelos em que se incorporam regras adicionais de funcionalidade para enriquecer o poder de modelagem. São consideradas três subclasses (DAVID & ALLA, 1994): modelos equivalentes a máquinas de Touring, modelos para sistemas contínuos e híbridos, modelos de sistemas que evoluem em função da ocorrência de eventos externos ou do tempo.

Outra forma de classificar as RdP é em função de sua aplicação prática. Assim têm-se as RdP interpretadas. Neste tipo de redes são associadas variáveis com significado prático às transições, representando condições e ações existentes no sistema. Tais variáveis podem indicar o estado de atuadores, sensores, etc., permitindo assim, modelar a interação com o ambiente externo (CARDOSO & VALETTE, 1997).

Assim, a RdP se constitui como uma poderosa ferramenta para a modelagem e análise de SEDs. Entretanto, na modelagem de sistemas complexos e com diferentes níveis de abstração se evidencia um ponto fraco em uma de suas

principais características: sua visualização gráfica. Desta maneira, verifica-se que é adequado que a modelagem inicial seja realizada utilizando grafos não marcados e a partir deste modelo seja conduzido um detalhamento gradativo e com interpretações formais para representar modelos dinâmicos. E, é neste contexto que as técnicas do PFS (Production Flow Schema) e RdP são consideradas.

Estas considerações conduziram ao uso de uma sistemática para a modelagem do sistema em estudo. Em síntese esta sistemática consiste em:

- Definição do modelo inicial PFS para descrever o comportamento do sistema.
- Definição dos intertravamentos presentes no sistema a partir da descrição do intertravamento de processo. Este intertravamento é modelado a partir do PFS gerado anteriormente aplicando-se o princípio de refinamentos sucessivos. Neste processo de transcrição, obtém-se o modelo em RdP desejado.
- Em seguida são anexados os modelos dos demais intertravamentos.
- A seguir, os modelos em RdP são validados com o auxílio de uma ferramenta de simulação.
- A partir do modelo validado em RdP, estes modelos são mapeados em grafos SFC para geração do programa de controle.

### **3.2.3. Refinamento Sucessivo**

A técnica de refinamentos sucessivos torna possível o entendimento e o detalhamento do sistema produtivo de modo progressivo. Inicialmente o modelo conceitual do sistema é desenvolvido com o PFS. O PFS baseia-se em aplicar refinamentos sucessivos através de uma abordagem *top-down* (SANTOS, 2000), de maneira que seja possível inserir progressivamente no modelo o detalhamento dos processos envolvidos. O objetivo é representar claramente o fluxo de operações tendo como referência a evolução dinâmica de um determinado processo. A partir do refinamento do PFS pode ser gerado um modelo em RdP para descrever o comportamento dinâmico detalhado do sistema.

Na modelagem do comportamento dinâmico do sistema, o modelo gerado

em rede de Petri detalha o funcionamento das diversas partes do sistema (até o nível desejado), através da evolução dinâmica da marcação do grafo (MIYAGI, 1996).

Quando são utilizados equipamentos de controle programáveis, o detalhamento das atividades pode ser realizado até um nível de operação isto é, onde as ações são especificadas pelo programa de controle disponível ou implementado.

### **3.2.4. Intertravamentos**

O conceito de intertravamento está relacionado à especificação de condições restritivas, que não permitem qualquer tipo de alteração de ação ou estado até que estados ou ações anteriores sejam completadas. Os objetivos dos intertravamentos são garantir a segurança, evitar danos aos equipamentos e evitar o encadeamento de acidentes. Na prática não pode ocorrer erros de operação ou falhas de funcionamento para que os equipamentos sejam danificados. A tabela 2 descreve os vários tipos de intertravamentos (SANTOS, 2000).

**Tabela 2: Tipos de intertravamentos.**

<b>Intertravamento</b>	<b>Estratégia de Controle</b>
De partida	São condições que devem estar satisfeitas no instante de partida e que não são consideradas durante o estado de funcionamento.
De funcionamento	São condições que devem ser satisfeitas na inicialização e durante o funcionamento
Temporizado	Determina-se um intervalo de tempo entre o fucionamento de cada equipamento ou num mesmo equipamento
De não simultaneidade	Evita que certos estados ocorram simultaneamente em diversos equipamentos
De sequência	Estabelece as condições de habilitação ou inibição de ações entre equipamentos interligados em série
Do processo	Estabelece as condições de habilitação ou inibição de transição de estados

### **3.3. Validação dos Modelos em RdP**

Validação é a confirmação de que um modelo é uma representação adequada do sistema real. Validação é geralmente resultante da calibração do modelo, isto é, um processo iterativo de comparar dados do modelo com o comportamento do sistema real, usando as discrepâncias entre os dois para melhorar o modelo. Este processo é repetido até que o modelo seja julgado aceitável (MIYAGI, 2006).

Para validar o modelo do sistema de controle é preciso modelar o objeto de controle, bem como as entradas e as saídas. Posteriormente é realizado o modelamento com uma ferramenta para a simulação de sistemas discretos como o HPSim. O HPSim é um software para simulação de RdP que apresenta uma interface intuitiva de fácil utilização. Entre suas vantagens está a possibilidade do acompanhamento da evolução do estado da rede de uma forma gráfica, o que auxilia no desenvolvimento do modelo e na detecção de erros.

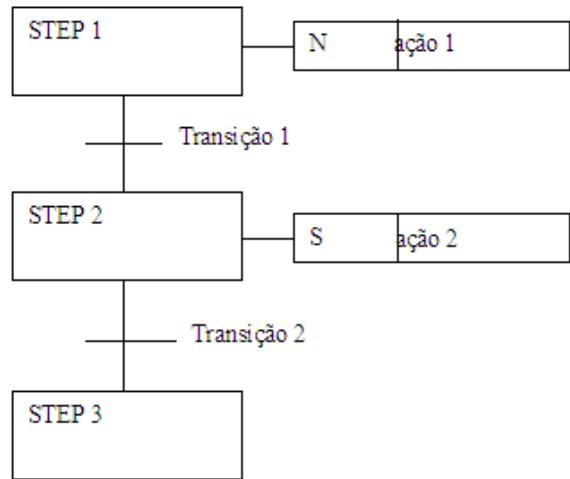
### **3.4. Mapeamento Isomórfico**

#### **3.4.1. Linguagem de Programação SFC**

A norma IEC6131-3 reconhece como linguagens *IL* (Lista de Instrução), *ST* (Texto Estruturado), *LD* (Diagrama de Reles) e *FBD* (Diagrama de Blocos de Função) como linguagens de programação de CPs (MIYAGI, 1996), ao passo que o *SFC* (Sequential Function Chart) apenas recentemente deixou de ser considerada uma técnica de representação de modelos de controle para ser computável e constituir-se em mais uma linguagem gráfica da norma.

O SFC descreve graficamente o comportamento seqüencial de um programa de controle como mostra a figura 7. É derivado de RdP e do Grafcet IEC 848. O SFC estrutura a organização interna de um programa, ajudando a decompor um problema de controle em partes gerenciáveis, enquanto mantém uma visão global da solução do problema. Consiste em um conjunto de *steps*, ligados a blocos de ação e transições. Cada *step* representa um estado particular do sistema sob

controle. A transição é associada com a condição, que, quando verdadeira, desativa o *step* anterior a ela e ativa o *step* seguinte. Cada elemento pode ser programado em qualquer linguagem IEC, inclusive o próprio SFC. É possível a implementação, inclusive, de seqüências paralelas, como usualmente requerido em aplicações de processos batch. É uma linguagem originada da RdP, sendo adequada para o controle de sistemas de manufatura (BRAGA, 2002).



**Figura 7: Programa SFC.**

As linguagens tabulares descrevem as operações por meio de tabelas contendo ações correspondentes para cada passo, uma identificação do próximo passo a ser realizado e a condição necessária para que ocorra a transição para o próximo passo. Não é muito utilizada, uma vez que os sistemas de controle são dinâmicos e melhor representados por uma sequencia de atividades controladas.

### **3.4.2. Mapeamento de RdP em SFC**

O mapeamento isomórfico de RdP para SFC consiste transformar o modelo em RdP em um programa desenvolvido em linguagem SFC através de substituições elemento a elemento, por meio de analogias entre as duas linguagens, de tal forma que o programa final em SFC apresente a mesma forma do algoritmo em RdP utilizado como base. Para isso é necessário que se

estabeleça regras de substituição que relacionem cada elemento da RdP a um elemento em SFC. É importante lembrar, que como SFC se trata de uma linguagem de controle, para modelos RdP que incluem a parte operativa, o mapeamento isomórfico só é realizado para a parte de controle do modelo. Portanto, o mapeamento é feito da seguinte maneira.

- todos os locais existentes em RdP são convertidos em steps do SFC. Aqui existe o problema de que, diferentemente de RdP, em SFC não é possível utilizar-se diretamente a posição de um *step* (ON/OFF) como entrada para uma transição. Por isso, nos casos em que isso é necessário, é aconselhável utilizar-se *actions* para setar memórias booleanas durante o tempo em que o *step* estiver acionado e utilizar o valor da memória como condição para a transição.
- as transições em RdP são substituídas por transições em SFC com a devida consideração da diferença de notação, por exemplo para os casos em que uma transição recebe ou passa a marca de dois ou mais *steps* simultaneamente.
- os arcos de fluxo das RdP são transformados em arcos de fluxo em SFC.
- nos casos em que arcos habilitadores e inibidores que provêm dos dispositivos de detecção e comando para transições do controle, os mesmos são convertidos em entradas para as condições das transições no SFC, sendo a negação da entrada, no caso de inibidores, e a afirmação, no caso de habilitadores. Ou seja, os mesmos são as entradas do controle.
- nos casos em que arcos habilitadores e inibidores são saídas do algoritmo de controle, os mesmos são convertidos em *actions* do tipo “non holding” (N) dos steps relativos aos locais de saídas destes arcos. Para os casos em que arcos de dois locais diferentes são usados como saída do controle para a mesma transição da parte operativa pode-se utilizar *action* tipo N em um deles para uma memória e colocar a mesma como condição para a saída do outro.

Desta maneira garantiremos que cada saída do controlador seja acionada por um step de cada vez, evitando conflitos.

- as partes ligadas por arcos de fluxo no algoritmo de controle nas RdP devem se tornar um única sequência no SFC, enquanto as partes que do algoritmo que apenas se relacionam por arcos habilitadores e inibidores ou não se relacionam devem estar contidas em seqüências diferentes do SFC. Visto a lógica de simulação das RdP é possível colocar todas as seqüências em um único Function Block, mas essa pode não ser a decisão mais inteligente para simulação, uma vez que em não se fazendo um emulador, que coloque entradas no simulador automaticamente de forma coerente ao sistema, a forma convencional de testar o programa seria setando entradas manualmente uma a uma, o que se torna quase impossível quando o número de entradas utilizadas simultaneamente passa de 2 ou 3 e o número de seqüências é tão grande que não é possível observar na tela todas ao mesmo tempo.
- em cada sequência é preciso escolher um *step* como *step* inicial, o qual será ativado assim que o function block for chamado. Deve-se escolher como *step* inicial um *step* que se sabe que é coerente com a posição inicial de funcionamento do sistema, ou o *step* da sequência que ficará ativado a maior parte do tempo. No caso de haver algum *step* que não pode ser acionado paralelamente com algum outro *step* de alguma outra sequência, principalmente quando o outro *step* conflitante for um *step* inicial, deve ser feita uma análise minuciosa para escolher o *step* inicial. O esperado é que estando atendidas as condições para a passagem do *step*, as *actions* nem possam ser realizadas antes que o *step* seja desativado, mas é bom tomar precauções nesse sentido, para o caso de haver erro na leitura de alguma entrada.

## 4. ESTUDO DE CASO

### 4.1. *Descrição do SFR*

A seguir apresenta-se uma descrição textual detalhada das atividades que são realizadas no SFR correspondente ao estudo de caso.

- **Recebimento de matéria-prima.** Nesse processo, a matéria prima, que chega na maior parte através de caminhões, é descarregada para os estoques da fábrica.
- **Pesagem.** Os diferentes ingredientes utilizados para produzir a ração são colocados em silos que alimentam uma balança. Um operador joga de um em um os ingredientes desses silos na balança de forma a gerar a receita de ração desejada. A balança pesa bateladas de 1 tonelada.
- **Mistura.** Nesse processo um misturador é utilizado para misturar a receita proveniente da balança.
- **Moagem.** Do misturador o produto em fabricação segue para a moagem. Desse processo em diante, a produção de insumos e petfoods são separadas, ou seja, o maquinário e a área da fábrica para produção de psumos e de petfoods é separado. Nesse processo, a mistura é moída até virar um pó fino para ser extrudado.
- **Cozimento e Extrusão.** O pó fino proveniente da mistura vai para a extrusão, onde ele passa por cozimento, que é adição de vapor d'água e pela extrusão em si, que é processo que dá forma aos grãos ração. As formas são diferentes para cada produto.
- **Secagem.** Consiste em pegar a ração úmida e amolecida, que acaba de sair da do cozimento e da extrusão e é levada ao secador através de transporte pneumático, e diminuir a sua umidade, fazendo-a passar por 15 minutos de exposição a uma temperatura de 100 °C.
- **Recobrimento ou Engorduramento.** Esse processo é aplicado somente aos Petfoods, pois cães e gatos são carnívoros e tem um olfato mais aguçado, o que exige melhor aparência, sabor e cheiro dos alimentos.

Nesse processo a ração é banhada com óleo, palactantes e corantes. As rações que não passam por esse processo são peletizadas. Portanto, os Petfoods também são chamados de não-peletizados.

- **Resfriamento.** Nesse processo, o material proveniente da extrusão e do recobrimento, que se encontra a cerca de 80 °C, vai para um resfriador, onde o material vai ser levado à temperatura ambiente por meio de ventilação. Esse processo é necessário, porque o ensaque não pode ser feito com o produto quente.
- **Ensaque.** Nesse processo, o produto do resfriamento é colocado em embalagens para venda.
- **Recebimento de matéria-prima.** Nesse processo, a matéria prima, que chega na maior parte através de caminhões, é descarregada para os estoques da fábrica.
- **Pesagem.** Os diferentes ingredientes utilizados para produzir a ração são colocados em silos que alimentam uma balança. Um operador joga de um em um os ingredientes desses silos na balança de forma a gerar a receita de ração desejada. A balança pesa bateladas de 1 tonelada.
- **Mistura.** Nesse processo um misturador é utilizado para misturar a receita proveniente da balança.
- **Moagem.** Do misturador o produto em fabricação segue para a moagem. Desse processo em diante, a produção de Insumos e Petfoods são separadas, ou seja, o maquinário e a área da fábrica para produção de Insumos e de Petfoods é separado. Nesse processo, a mistura é moída até virar um pó fino para ser extrudado.
- **Cozimento e Extrusão.** O pó fino proveniente da mistura vai para a extrusão, onde ele passa por cozimento, que é adição de vapor d'água e pela extrusão em si, que é processo que dá forma aos grãos ração. As formas são diferentes para cada produto.
- **Secagem.** Consiste em pegar a ração úmida e amolecida, que acaba de sair da do cozimento e da extrusão e é levada ao secador através de transporte pneumático, e diminuir a sua umidade, fazendo-a passar por 15 minutos de exposição a uma temperatura de 100 °C.

- **Recobrimento ou Engorduramento.** Esse processo é aplicado somente aos Petfoods, pois cães e gatos são carnívoros e tem um olfato mais aguçado, o que exige melhor aparência, sabor e cheiro dos alimentos. Nesse processo a ração é banhada com óleo, palactantes e corantes. As rações que não passam por esse processo são peletizadas. Portanto, os Petfoods também são chamados de não-peletizados.
- **Resfriamento.** Nesse processo, o material proveniente da extrusão e do recobrimento, que se encontra a cerca de 80 °C, vai para um resfriador, onde o material vai ser levado à temperatura ambiente por meio de ventilação. Esse processo é necessário, porque o ensaque não pode ser feito com o produto quente.
- **Ensaque.** Nesse processo, o produto do resfriamento é colocado em embalagens para venda.

A planta do sistema atual é mostrada na figura 8.

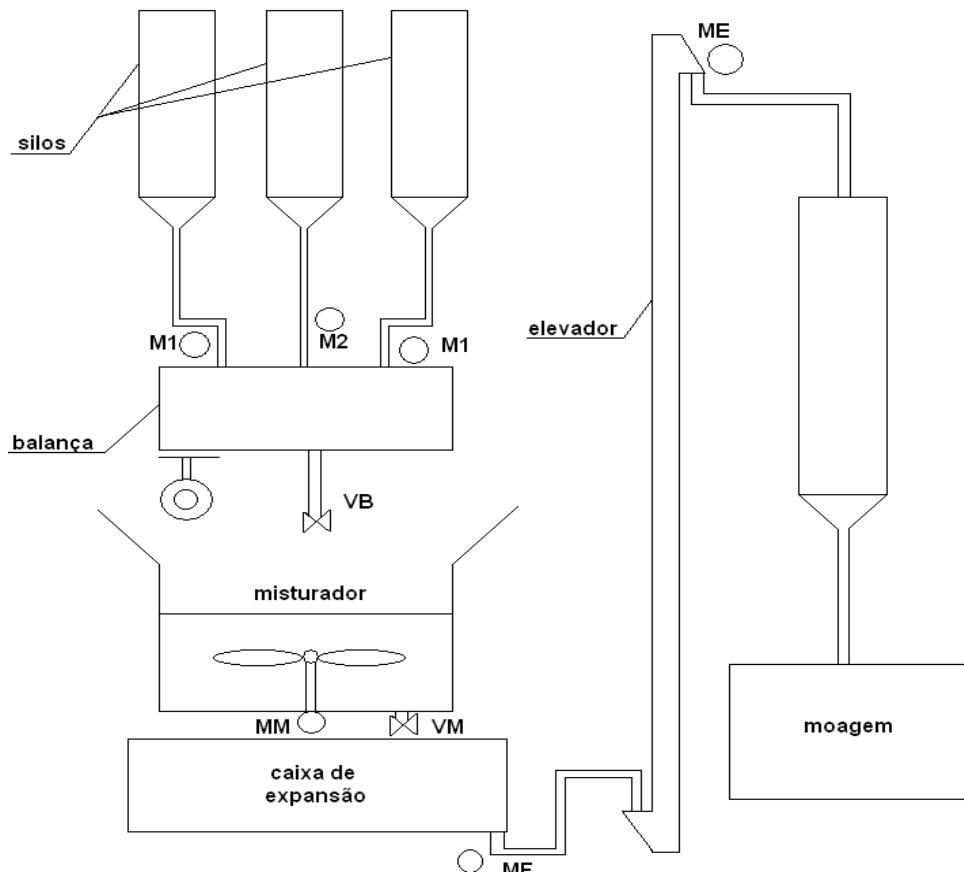


Figura 8: Diagrama Esquemático do Objeto de Controle.

Os silos da pesagem, que possuem os ingredientes para a pesagem, alimentam a balança através de roscas transportadoras, levam o material do fundo dos silos de pesagem até a caçamba da balança. A receita pesada é descarregada através de comportas pneumáticas para o misturador que se localiza abaixo da balança. Realizada a mistura, o material é despejado numa caixa de expansão, através de comportas pneumáticas, e transportado por meio de uma rosca transportadora localizada no fundo desta caixa de expansão, até um elevador de canecas que leva aos silos de moagem.

Os dados da tabela 3 e da tabela 4 se referem aos equipamentos da instalação utilizados atualmente.

**Tabela 3: Dados de equipamentos da instalação.**

Nº m e r o	Apli Ca Cão	Có di go	Quan ti da de	Po tên cia (kW)	Ve lo ci da de (rpm)	Tem são (V)	Cor ren te (A)	Ter mi nais- ei xô	Códi go do fa bri cante	T i p o	Re du ção	Ti po de con tro le	Ob ser va coes
1	silos fuso maior	M1	9	2,5-3	1720-3440	380	5,9-6,6	1	DZ100L 4/2	externo	18,69	ON /OF F	fusos maiores
2	silos fuso menor	M2	5	1,5	1720	380	-	1	-	externo	18,69	ON /OF F	fusos menores
3	Mistura-dor	MM	1	14	1720	380	-	-	-	interno	-	ON /OF F	-
4	fuso saída mistura-dor	MF	1	2,5-3	1720-3440	380	5,9-6,6	1		externo	18,69	ON /OF F	-
5	elevador	ME	2	2,5-3	1720-3440	380	5,9-6,6	1	-	externo	40	ON /OF F	-

**Tabela 4: Lista de Válvulas Solenóides (atuadores).**

Número	Equipamento	Aplicação	Código	Tipo SS 2p	Tipo DS 2p	Tipo DS 3p	Outor tipo	Ação na mente pneumático	Bobina energizada	Não energizado	Tensão (V)
1	balança	alívio balança	VB	X	-	-	-	sim	abre	fecha	220
2	misturador	alivio misturador	VM	X	-	-	-	sim	abre	fecha	220

Para se adequar à demanda exigida pelo mercado, o processo passará por algumas mudanças. Hoje a produção está limitada em cerca 8 toneladas de ração por hora. A linha de produção está sendo ajustada para ter capacidade para produzir 30 toneladas por hora, de forma a atender à demanda do mercado, prevista pelo setor comercial da fábrica.

Atualmente o gargalo da produção é o secador de ração. Com a recente aquisição de um novo secador de ração, que ainda não foi instalado, o gargalo será o misturador, que limitará a produção em cerca de 11 toneladas por hora. Por isso, já há na fábrica uma pré-disposição de se trocar o misturador para atender às novas necessidades da linha. Por conta disso, a fábrica precisaria aumentar a capacidade da balança, das roscas transportadoras e dos elevadores de canecas relacionados à balança e ao misturador.

A quantidade de cada ingrediente depende das receitas (uma para cada produto da fábrica) geradas por um zootecnista da fábrica. Para gerar as receitas usa-se um programa de otimização, que otimiza os custos de produção relacionando os preços médios de estoque de cada ingrediente com a tabela nutricional de cada produto.

Na fábrica, existem 14 silos de alimentação na balança, porém a maioria dos produtos utiliza apenas 10 ingredientes para sua fórmula, sendo que o mais importante deles ocupa dois silos. Atualmente, o processo de carregamento da balança é realizado por um operador que, através de um painel com botões, que estão ligados a contatores, aciona os motores das roscas transportadoras, e acompanha em um mostrador, o quanto de massa existe na caçamba da balança

em cada instante. Os ingredientes são descarregados na caçamba da balança em uma ordem crescente de densidade.

De acordo com nossas medições na fábrica, mostradas nas tabelas 3 e 4, a balança pesa 1 tonelada entre um mínimo de 2 minutos e 32 segundos e um máximo de 2 minutos e 59 segundos. Com a nova balança, a fábrica teria de pesar cerca 2 toneladas a cada 4 minutos para que a linha de produção tenha capacidade para produzir 30 t/h de ração.

O carregamento de macro-nutrientes se completa nos 971 kg. Após alcançar 971 kg, o operador espera a mistura anterior ser misturada para começar o descarregamento do misturador para uma caixa de expansão de capacidade de 500 kg, que é descarregado por uma rosca transportadora que leva a mistura a um elevador, de onde é levada para os silos de moagem.

A presença de material no misturador é monitorada por um sensor e está ligado a um "led" no painel do operador. Ao apagar, o descarregamento do misturador estará completado. Logo em seguida, o operador começa a descarregar os ingredientes da balança. Assim que a caçamba está completamente vazia as comportas pneumáticas da mesma são fechadas e o operador manualmente coloca os micros ingredientes no misturador para completar os 1000 kg atendendo à especificação do misturador.

As medições realizadas mostram que o descarregamento do misturador demora 44,71 segundos em média. Quando há produtos diferentes em bateladas consecutivas troca-se o silo de moagem para o qual a mistura é conduzida.

Todas as informações e valores citados acima podem ser observados na tabela 5 e na tabela 6. Na Tab. 5 foi feita uma estimativa do tempo de pesagem caso fosse possível trabalhar na potência nominal de cada motor da balança com o uso de inversores de freqüência ou de diminuição das reduções.

**Tabela 5: Tempos dos processos de pesagem, mistura, carregamentos e descarregamentos.**

	Pesagem (s)	Espera (s)	Mistura (s)	Descarregamento Misturador (s)	Descarregamento Balança (s)	Total Batelada (s)
Medição -1	179	61	240	45	52	337
Medição 0	162	78	240	45	30	315
Medição 1	175	65	240	45	39	324
Medição 2	154	86	240	45	70	355
Medição 3	168	72	240	44	26	310
Medição 4	154	86	240	44	25	309
Medição 5	152	88	240	45	25	310
Média	163,43	76,571	240	44,71	38,14	322,86
Desvio Padrão	10,86	10,861	0	0,49	17,16	17,41

**Tabela 6: Tabela de pesagem e erros.**

	Pesagem Cumulativa 4 (kg)	Pesagem Individual 4 (kg)	Erro Absoluto Medição 4 (kg)	Erro Percentual Medição 4	Pesagem Cumulativa 5 (kg)	Pesagem Individual 5 (kg)	Erro Absoluto Medição 5 (kg)	Erro Percentual Medição 5	Média de Pesagem Individual (kg)	Erro Máximo Absoluto Total (kg)	Erro Máximo Percentual por Ingrediente
Ingrediente 1	155	155	5	3,33%	151	151	1	0,67%	152,20	5	3,33%
Ingrediente 2	331	176	-4	-2,22%	330	179	-1	-0,56%	178,60	4	2,22%
Ingrediente 3	508	177	1	0,57%	512	182	6	3,41%	177,40	6	3,41%
Ingrediente 4	609	101	1	1,00%	607	95	-5	-5,00%	98,40	5	5,00%
Ingrediente 5	706	97	-3	-3,00%	708	101	1	1,00%	100,40	4	4,00%
Ingrediente 6	798	92	12	15,00%	796	88	8	10,00%	87,40	12	15,00%
Ingrediente 7	847	49	-11	-18,33%	847	51	-9	-15,00%	54,00	11	18,33%
Ingrediente 8	907	60	0	0,00%	906	59	-1	-1,67%	57,60	5	8,33%
Ingrediente 9	954	47	7	17,50%	949	43	3	7,50%	48,20	11	27,50%
Ingrediente 10	973	19	-6	-24,00%	971	22	-3	-12,00%	18,40	8	32,00%
Média	-	-	5	8,50%	-	-	3,8	5,68%	-	7,1	11,91%
Desvio Padrão	-	-	4,109609	9,12%	-	-	3,047768	5,20%	-	3,142893	10,85%

## **4.2. Modelo Esquemático**

### **Modelo Esquemático do Futuro Layout da Fábrica**

A proposta de melhoria para atingir o requisito de bateladas de 2 toneladas a cada 5 minutos por batelada é instalar um novo misturador que realizaria a mistura de 2 toneladas em 3,5 minutos (tempo padrão dos misturadores comerciais para misturar rações com densidade média de 0,6 Kg/m<sup>3</sup>) e aumentar a capacidade de pesagem para 2 toneladas por batelada. Por questões construtivas, portanto, a mistura teria que ser feita em um local elevado da fábrica e o material da balança teria que ser transportado até o misturador por meio de rosca e elevadores.

O tempo estimado para carregar e descarregar o misturador, com o uso de comportas pneumáticas triplas maiores do que as que são usadas atualmente com uma área total de abertura cerca de 4 vezes maior do que a da comporta dupla da balança, é no total (carregamento e descarregamento somados) de 1 minuto. Assim o tempo de carregamento e descarregamento da balança terá que ser ajustado ao tempo total do misturador de 4,5 minutos. Embaixo da balança haveria uma caixa de expansão de 2 toneladas, no fundo da qual haverá uma rosca transportadora. Para descarregar a caçamba da balança usaríamos as mesmas comportas pneumáticas triplas citadas anteriormente, com um tempo de descarregamento estimado em 1 minuto, já que a receita ainda não estaria misturada, o que nos levaria a um tempo ideal de pesagem de 3,5 minutos.

Para atingir esse tempo, estudam-se junto com os funcionários quais seriam as possíveis medidas, podendo ir desde o uso de inversores de freqüência, diminuição das reduções ou a utilização de freios nos motores das rosca que saem dos silos de alimentação da balança. Ainda se estuda a possibilidade fazer a pesagem em duas caçambas, para que ingredientes diferentes possam ser pesados simultaneamente. Porém, a definição da solução para esse problema não é uma prioridade no momento, já que para modelagem e simulação podemos ver

toda a pesagem como uma única transição a ocorrer idealmente no tempo de 3,5 minutos.

Além disso, por uma demanda da fábrica, para evitar a presença de pequenos objetos perdidos no meio da receita, que atualmente costumam ocasionar a danificação das telas de moagem, decidiu-se colocar uma peneira (feedcleaner) por onde o material passaria antes de chegar à caçamba que comportará o material antes da entrada da batelada no misturador. Esses objetos indesejáveis costumam chegar junto com os carregamentos de matéria prima da fábrica, seja a granel ou ensacada como, por exemplo, porcas de caminhão, feixes de alumínio e até pequenas pedras.

Há também, uma demanda por passar a pesar e misturar a linha de rações peletizadas (insumos agrícolas) com a mesma balança e o mesmo misturador das rações não-peletizada. Ou seja, seria necessário colocar uma válvula desviadora no processo de forma que quando se tratasse da produção de peletizados, o produto seria encaminhado para os silos de moagem de peletizados, e quando o tratasse da produção de não-peletizados, o produto seria encaminhado para os silos de moagem de não-peletizados.

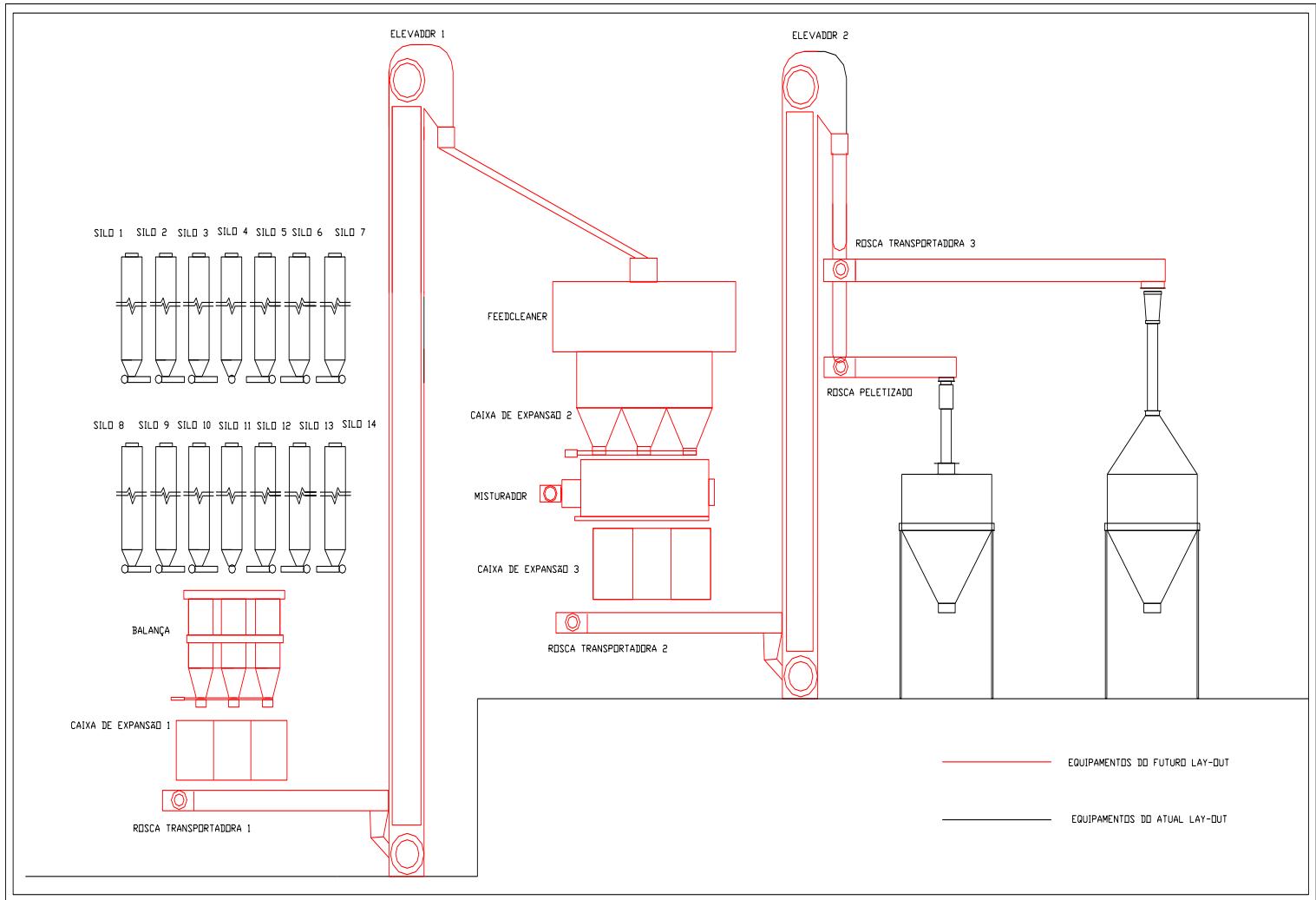
A sugestão para o futuro layout da fábrica encontra-se na figura 9.

### **4.3. *Modelo Estrutural***

#### **4.3.1. *Caso de Uso***

Na especificação dos casos de uso, apresentados aqui apenas por um diagrama (vide figura 10), objetivamos ser o mais simplistas possíveis, sem colocar em risco a segurança do sistema.

Para todos os casos de uso, temos um total de três atores que são: o operador, o gerente de produção e o zootecnista.



**Figura 9: Sugestão de futuro layout da fábrica.**

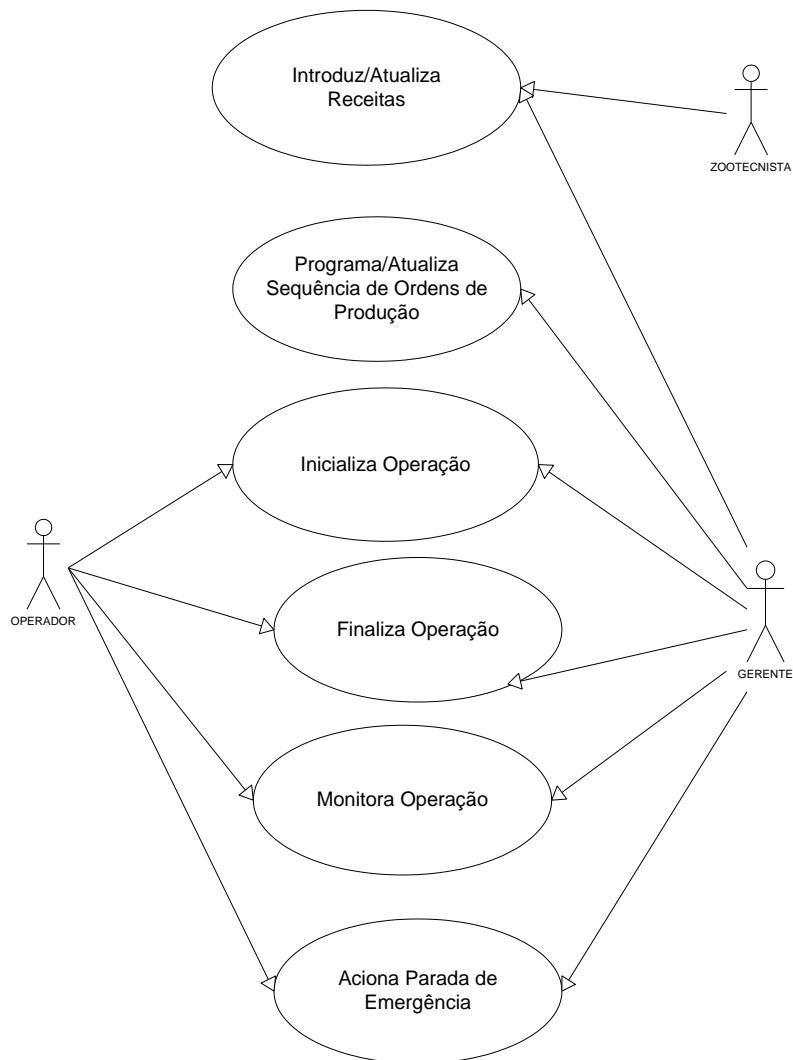
O operador representa qualquer um que tenha acesso ao sistema supervisório, sem necessidade de login com senha, o que já seria necessário para o gerente de produção e para o zootecnista.

Ao zootecnista e ao gerente fica a tarefa de inserção e atualização de receitas. Para receitas de produtos já existentes no sistema, faz-se apenas uma atualização, para receitas de novos produtos faz-se a inserção de uma nova receita no sistema que leva o nome do produto a que ela se refere.

Exclusivamente ao gerente fica a tarefa de inserção ou atualização de seqüências de ordens de produção. Essas seqüências devem levar os nomes de cada produto a ser produzido de duas em duas toneladas a cada batida. Assim, o

sistema vai utilizar a receita associada a esse produto para pesar a batida do produto relacionado a essa ordem de produção.

Ao operador e ao gerente de produção cabem os outros quatro casos de uso mais operacionais que são: inicialização da operação, finalização da operação, monitoramento da operação e acionamento da parada de emergência.



**Figura 10: Caso de uso.**

#### 4.3.2. Dispositivos

Os principais dispositivos utilizados no controle do SFR estão listados abaixo.

### ***Dispositivo de monitoração***

Cada dispositivo de atuação e local de armazenamento de material contém ao menos um LED para monitoração. O LED mostra um dos estados binário possível de determinado equipamento do sistema. O valor de um sensor de um dispositivo de atuação ou local de armazenamento armazenado em uma variável de estado no dispositivo de controle é jogado em uma saída ligada a um determinado LED.

### ***Dispositivos de comando***

Os dispositivos de comandos utilizados são compostos por botões, um deles de emergência e o outro de liga/desliga. O botão de emergência quando acionado para todo o sistema, todos os equipamentos param de funcionar imediatamente. Este botão é utilizado em caso de acidente de trabalho ou quebra de algum equipamento. O botão de liga/desliga desativa todos os equipamentos, porém espera terminar a última ordem. Nesse caso, é acionado esse botão quando a fábrica para por algumas horas no dia.

### ***Dispositivos de atuação***

Os dispositivos de atuação, como motores e válvulas, através do sistema de controle, transmitem um sinal binário aos dispositivos de detecção instalados em cada objeto de controle.

### ***Dispositivos de detecção***

Alguns tipos de sensores instalados no sistema compõem os dispositivos de detecção. Sensores fotoéletricos do tipo “through-beam” são utilizados para indicar presença ou não de material dentro dos equipamentos de armazenamento e verificação de nível mínimo nos silos. Outros tipos, como sensores de rotação, são utilizados em equipamentos que utilizam motores para o seu funcionamento.

#### 4.4.3. Painel

Um painel de comando compreende dispositivos de monitoração e acionamento como mostra a figura 11. O painel auxilia o operador a verificar o andamento da produção, assim como alguma pane no sistema. Caso ocorra algum tipo de problema na linha, o operador pode acionar um dos 2 botões no painel. Na figura 11 pode-se verificar que alguns equipamentos contêm mais de um LED.

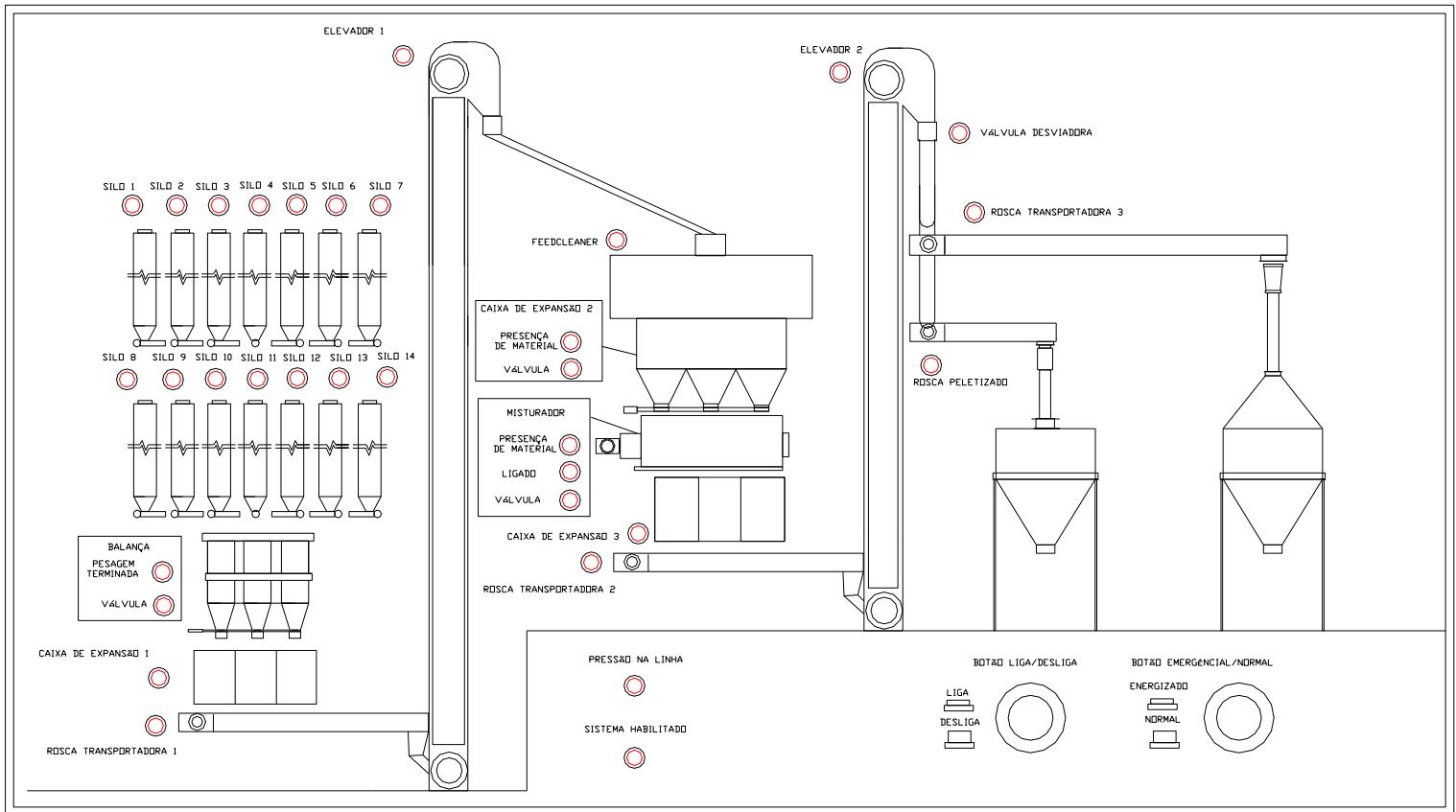


Figura 11: Painel de comando.

#### 4.3.3. Arquitetura do Sistema de Controle

Quanto à arquitetura do sistema, o diagrama da figura 12 é bem auto-explicativo. Temos um sistema supervisório que faz a interface com os atores

através de uma tela de PC, a partir do qual o sistema recebe todos os comandos e todos os dados necessários para sua operação por meio dos casos de uso explicitados acima. Os dados e comandos inseridos no sistema supervisório são passados para o CLP através de protocolo TCP/IP intermediado por um switch. No CLP, todo o controle é processado e há por meio de módulos I/O a entrada de sinais provenientes de sensores, as saídas para atuadores e painel de LEDs e a entrada hardwire do CLP do sistema de pesagem, comunicando as em que fase da pesagem encontra-se o sistema, sendo apenas duas posições possíveis. Por último temos a comunicação de dados entre o CLP do controle e o CLP do sistema de pesagem através de protocolo.

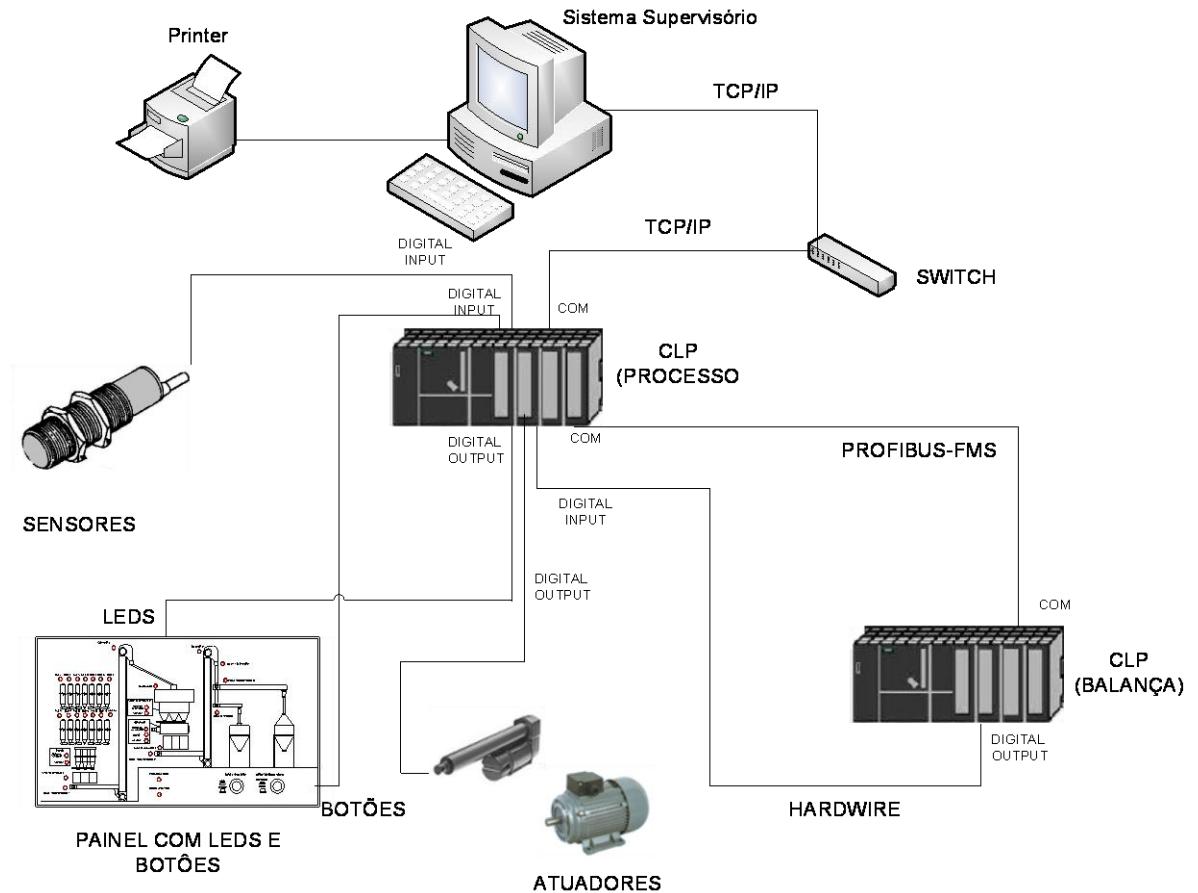


Figura 12: Arquitetura do sistema de controle.

#### 4.4. Construção do Algoritmo

##### PFS do sistema

A partir da sugestão do novo layout, modelou-se o comportamento do futuro sistema em PFS mostrado na figura 13.

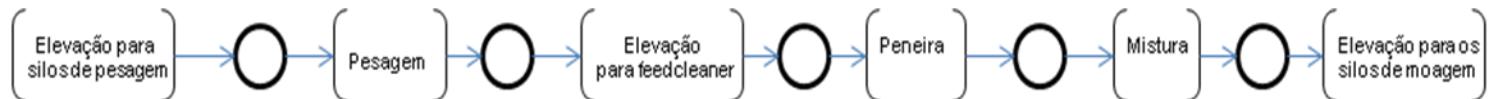


Figura 13: PFS do sistema a ser abordado na fábrica de ração.

Na figura 14 o PFS mostra-se com mais detalhes todas as atividades envolvidas desde a elevação para os silos de pesagem até os silos de moagem.

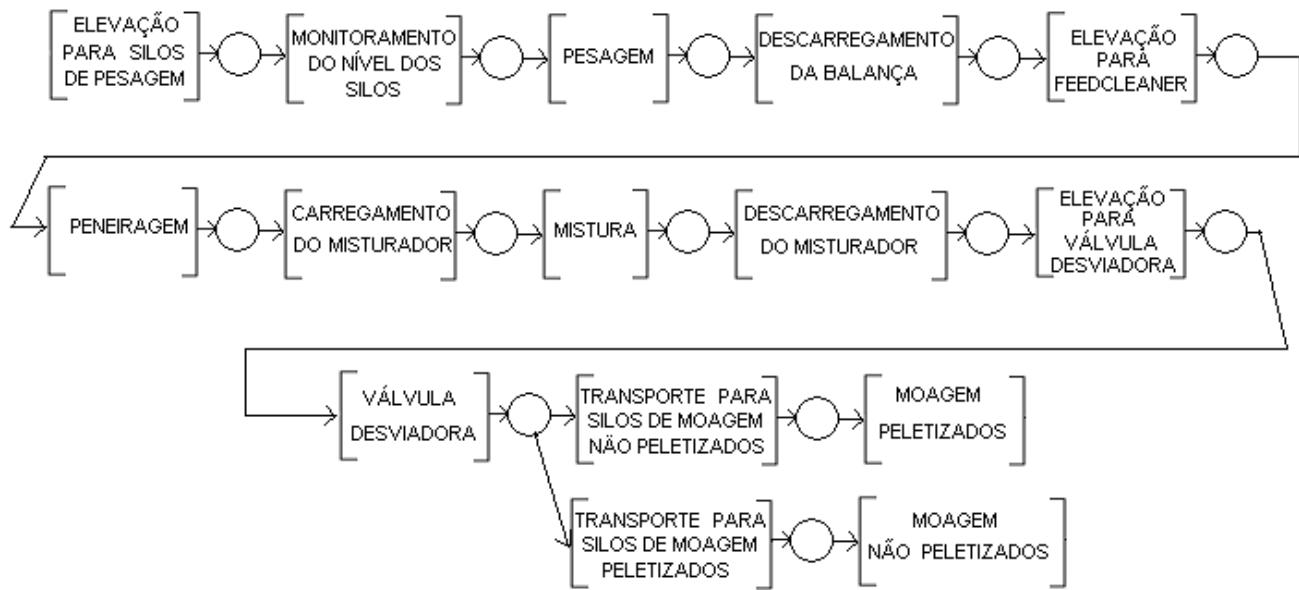


Figura 14: PFS detalhado do futuro processo.

##### Detalhamento dos Intertravamentos

Nas figuras 15 e 16 estão representadas todas as condições restritivas e todo tipo de inibição de operação ou funcionamento dos equipamentos do sistema.

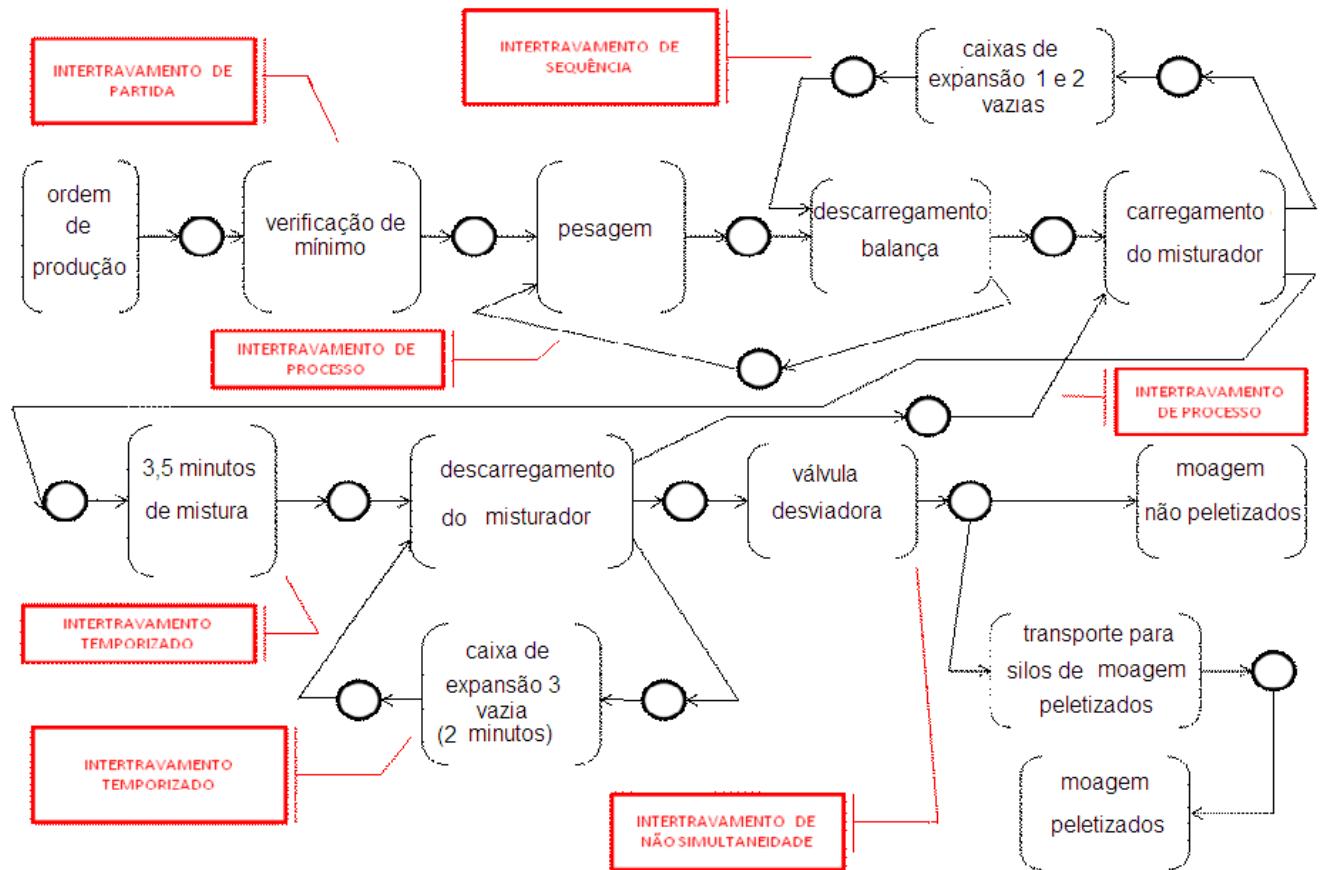
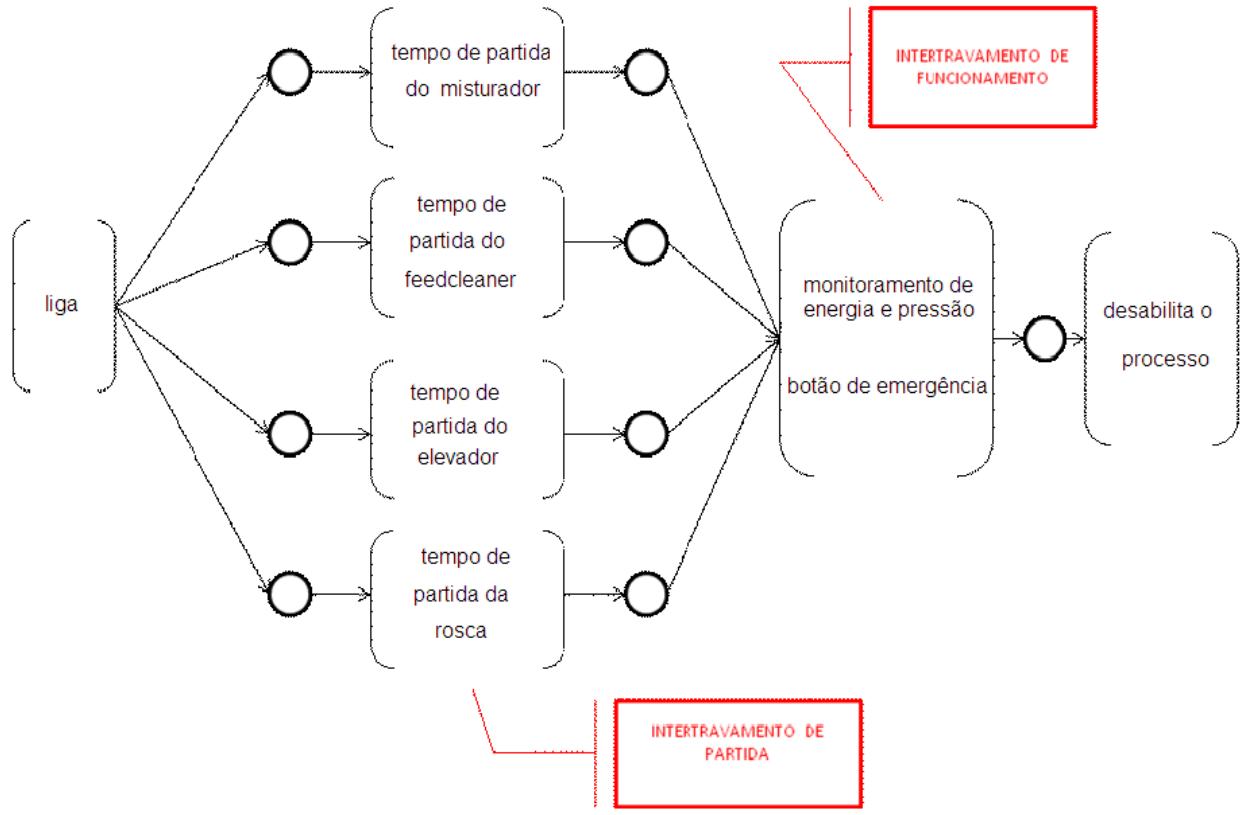


Figura 15: Detalhamento dos intertravamentos.

### • Intertravamento de Partida

As condições que devem ser estabelecidas na inicialização e não são consideradas durante o funcionamento ocorrem nos silos para verificação de mínimo e nas partidas do misturador, feedcleaner, elevadores e roscas. Os silos devem ser verificados antes da pesagem, se estão acima do nível necessário de cada macro ingrediente para uma batelada. Antes de deixar que o material entre no misturador, feedcleaner, elevadores e roscas é preciso que a partida seja dada de forma a diminuir a energia necessária para vencer a inércia.



**Figura 16: Detalhamento dos intertravamentos.**

- **Intertravamento de Funcionamento**

As condições necessárias na inicialização e durante o funcionamento são o fornecimento de pressão e energia dentro das especificações para o sistema. Caso o sistema precise ser desligado imediatamente por algum motivo, o botão de emergência será utilizado levando o sistema a desabilitar todos os equipamentos.

- **Intertravamento Temporizado**

Para esse caso, é determinado um intervalo de tempo entre o funcionamento de cada equipamento. Entre o carregamento e o descarregamento do misturador, ocorre a mistura durante 3 minutos e 30 segundos. Somente após a mistura ocorre o descarregamento para uma caixa de expansão com a abertura de escotilhas. O descarregamento da caixa de expansão abaixo do misturador é realizado por roscas em 2

minutos. Durante esse tempo não pode haver descarregamento do misturador.

- **Intertravamento de Não-Simultaneidade**

Esse intertravamento garante que a ocorrência de determinados eventos seja mutuamente exclusiva, assim como ocorre na válvula desviadora para os silos de moagem. Dependendo do tipo de ração a ser produzida, peletizada ou não-peletizada, a válvula desviadora permite a passagem da mistura para o silo de moagem de peletizados ou para os de não-peletizados, de forma não-simultânea.

- **Intertravamento de Sequência**

Esse tipo de intertravamento estabelece condições para habilitação ou inibição entre equipamentos interligados em série. O descarregamento da balança ocorre somente quando a caixa de expansão 1 estiver vazia e a caixa de expansão 2 estiver também vazia após descarregar no misturador.

- **Intertravamento de Processo**

Intertravamento de processo estabelece as condições de habilitação e inibição para a transição de estados. Esse tipo de intertravamento é identificado na balança e no misturador. A pesagem da balança só poderá ocorrer depois que essa estiver descarregada. No caso do misturador, o seu carregamento só poderá ocorrer depois que ele estiver descarregado.

### **Modelo para validação**

Para validar o modelo do sistema de controle que foi feito no HPSim foi preciso modelar o objeto de controle, bem como as entradas de comando e detecção, assim como as saídas de atuação e monitoramento. Para isso nós modelamos todos os objetos de controle da forma mais simples possível, com o menor número de estados possível, porém de forma a atender todas as necessidades demandadas para a validação do modelo.

Desta maneira foram modelados como objetos de controle o sistema de pesagem, as três caixas de expansão e o misturador. Para que o sistema de controle interaja com o objeto de controle, assim como acontece na realidade, foram colocados dispositivos de detecção e de atuação.

Assim, foram modelados de forma binária, todos os dispositivos de atuação como motores e válvulas, bem como todos os dispositivos de detecção que são basicamente os sensores de presença de material em cada objeto de controle. Foram também, exclusivamente para fim de monitoração, considerado que todos os dispositivos de atuação vão ser detectados por sensores de fim de curso e sensores de rotação mínima.

Como se pode ver no modelo, há saídas dos dispositivos de atuação para o sistema de controle, que na verdade são saídas de dispositivos de detecção instalados nesses dispositivos de atuação, para fim de monitoramento no caso da necessidade de manutenção, que se mostrou ser uma demanda para a fábrica.

Podem-se observar também a partir de todos os dispositivos de detecção, caixas de retenção associadas a eles, que fazem a intermediação entre o valor neles contido e o valor contido nos dispositivos de monitoração (LED's).

Essa parte da modelagem poderia ter sido simplificada ligando-se diretamente o modelo dos dispositivos de detecção ao modelo dos dispositivos de monitoração. Porém, como se intencionava utilizar esse modelo em RdP para a criação de um programa escrito de forma mais equivalente possível em Sequential Flow Chart (SFC), buscou-se manter a idéia de que, mesmo para uma tarefa simples como transferir o valor de uma entrada ligada a um sensor para uma saída ligada a um LED é preciso que esse valor seja armazenado em variáveis de estado no dispositivo de controle.

Informações mais detalhadas do modelo podem ser extraídas a partir da análise visual da figura 17. Visamos aqui apenas expor as diretrizes a partir das quais foi feita a modelagem para simplificar a interpretação de sua semântica e validá-lo. Ao final de algumas simulações, a partir de um processo interativo, as devidas correções de erros foram efetuadas e foi possível validar o modelo de

controle a partir desse modelo final. As figuras 18 a 20 representam os modelos de controle em SFC obtidos.

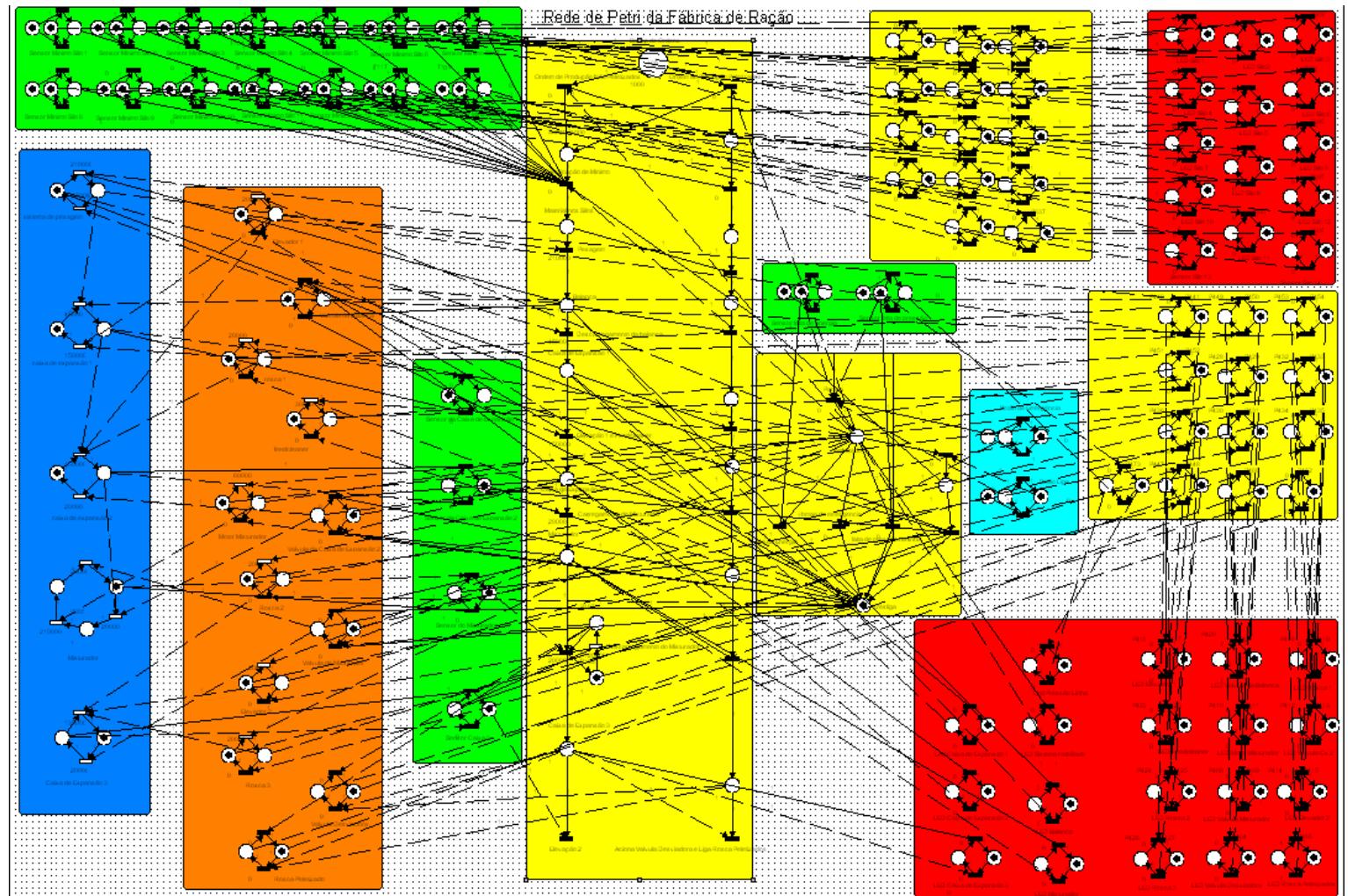


Figura 17: Rede de Petri da fabricação de ração.

### Legenda da RdP

	Objeto de controle		Sistema de controle
	Dispositivos de atuação		Dispositivos de monitoração
	Dispositivos de detecção		Dispositivos de comando

## Modelos SFC

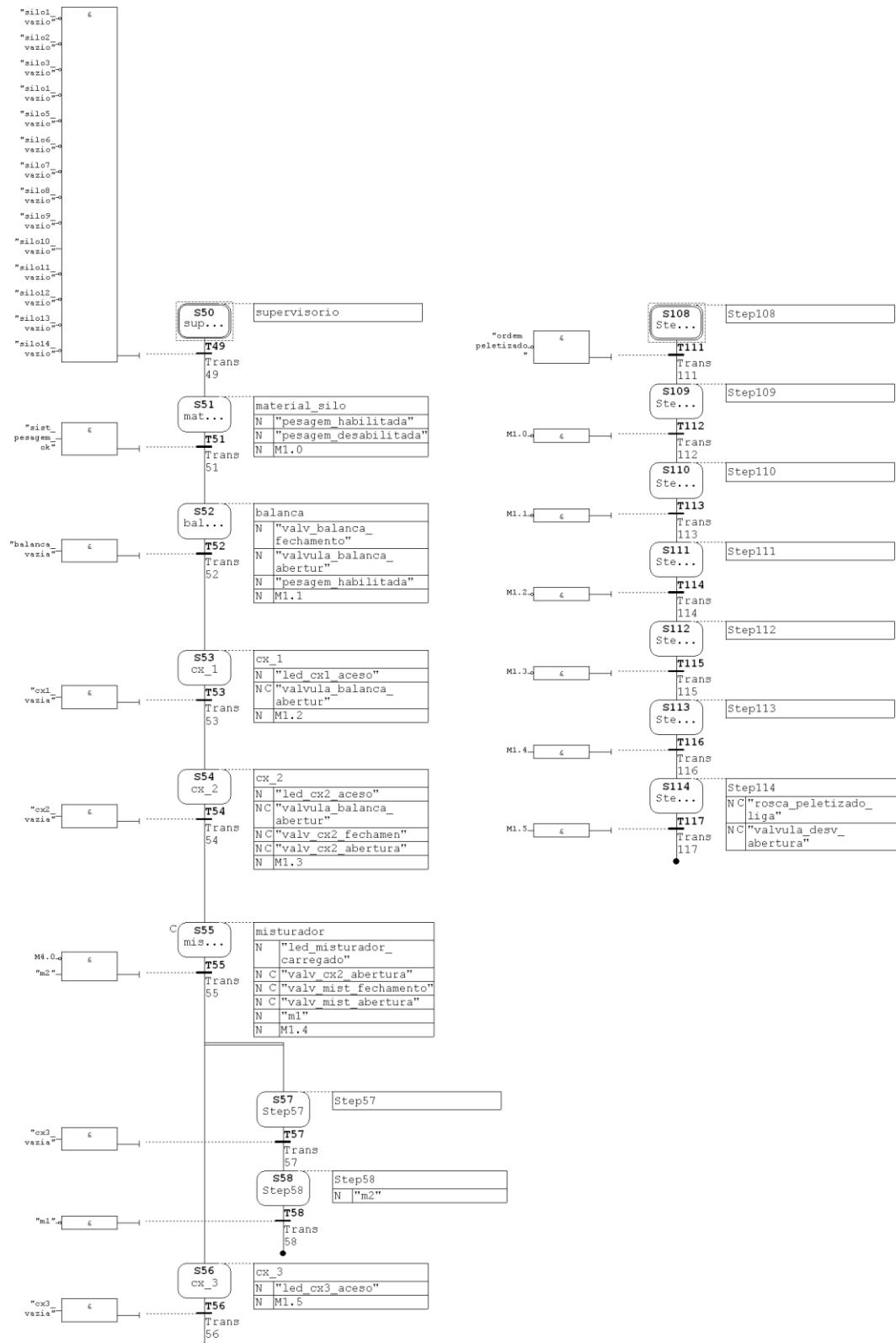


Figura 18: SFC do sistema.

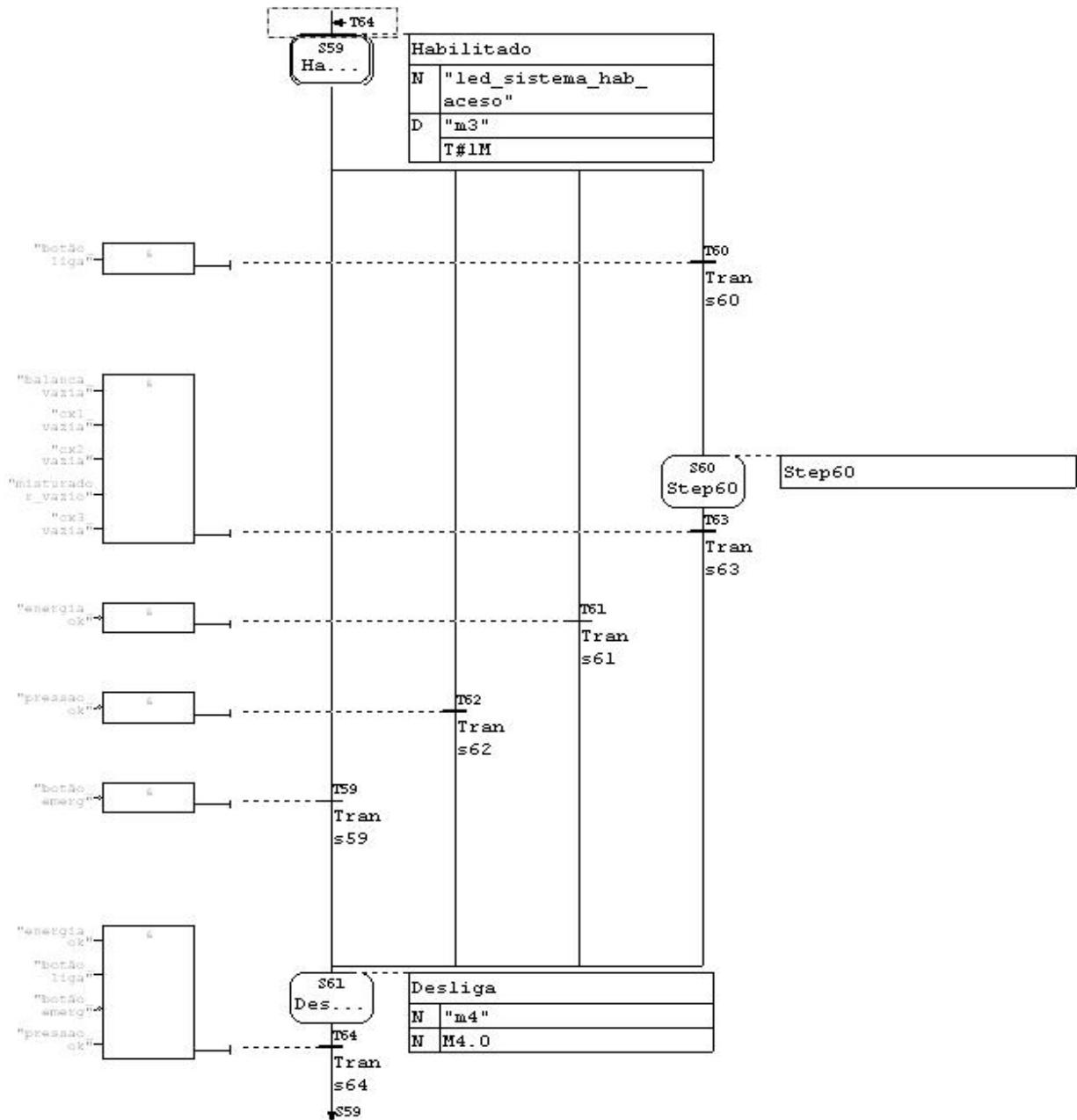
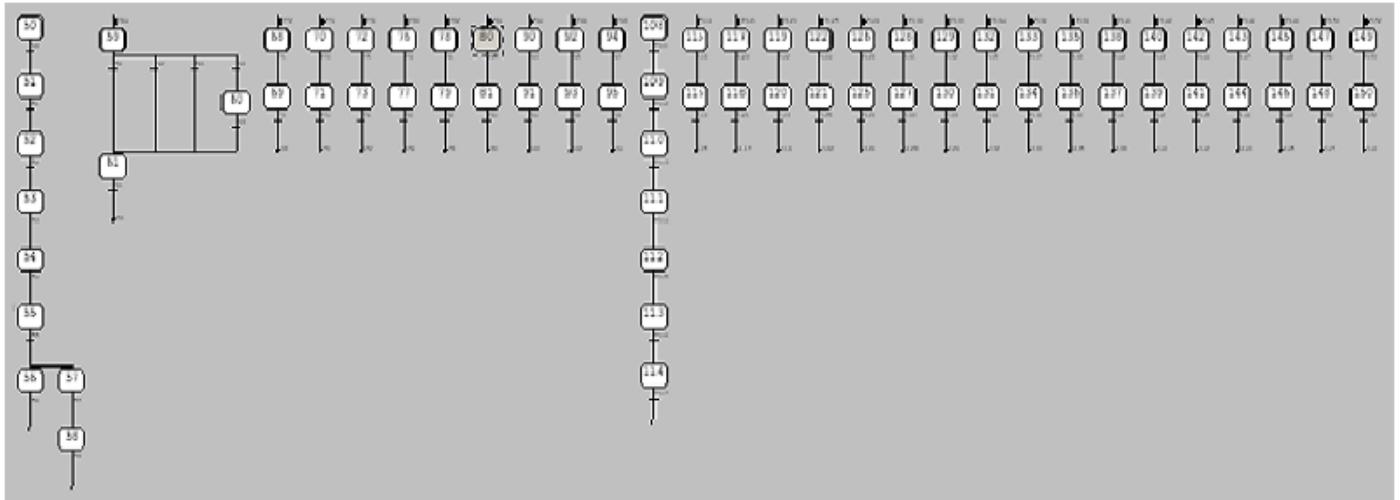


Figura 19: SFC do sistema.



**Figura 20: SFC do sistema.**

É importante observar que estes modelos foram simulados em STEP7, cuja análise demonstrou não haver falhas no algoritmo, confirmando os resultados já obtidos no simulador HPSim.

## 5. CONCLUSÃO

## Sobre os resultados obtidos

Como se pode observar, o trabalho foi muito além de uma simples elaboração de uma rotina de controle para uma série de processos previamente definidos a fim de atender às demandas.

O escopo do projeto foi desde a definição das melhorias estruturais no processo produtivo, até o estabelecimento de uma rotina de controle que potencializasse de forma compensatória os investimentos no sentido do deslocamento do gargalo e do atendimento da demanda de aumento da produção.

Para tanto, houve um longo e eficaz esforço nas fases de definição de requisitos, modelagem, definição de intertravamentos, refinamento sucessivo, análise do modelo comportamental detalhado sem *deadlocks*, criação da rotina de controle em SFC e simulação com STEP7.

Por conta de os requisitos terem sido bem definidos através das análises quantitativas da produção realizadas no início do trabalho e pelo fato de se ter chegado a um bom entendimento sobre as necessidades da fábrica, conseguiu-se definir com um alto nível de detalhamento cada aspecto do futuro sistema e cada necessidade do mesmo, o que foi essencial para definir os intertravamentos de forma correta.

Com a ajuda do simulador HPSim foi possível modelar, refinar e simular o processo produtivo proposto e, posteriormente, modelar, simular e validar o algoritmo de controle para o sistema, tendo em vista os modelos utilizados para o objeto de controle, os dispositivos de interface, a arquitetura do sistema de controle e os casos de uso do sistema definidos previamente. Escrevemos o programa em SFC com a rotina de controle pré-definida e simulamos o mesmo com o software STEP7.

Os resultados por simulação do controle foram bem sucedidos, validando a rotina e as técnicas implementadas, principalmente com relação ao mapeamento isomórfico e aplicação de steps como recursos interdependentes no SFC.

Isso posto, avaliamos com tremenda satisfação o trabalho, que foi essencialmente desafiador e totalmente abrangente, bem como seus resultados que foram totalmente condizentes com as expectativas.

### **Contribuições efetivas**

Além da aplicação de uma seqüência de técnicas avançadas para esse tipo de aplicação, a grande contribuição do trabalho consiste na aplicação da linguagem SFC na integração do processo produtivo em um SFR.

Trata-se de uma aplicação consistente de programação do controle de SEDs que efetivamente envolvem questões de seqüenciamento de atividades, sincronização de eventos e conflito de eventos mutuamente exclusivos. Neste contexto, houve um avanço no sentido de aplicar-se SFC para o controle de sistemas de maior complexidade uma vez que a maioria das aplicações atuais restringe-se ao controle de seqüenciamento para operação local de máquinas.

A contribuição também é muito importante para problemas relacionados a SFR no que tange à demonstração da eficiência e eficácia das técnicas utilizadas no projeto de sistemas de controle para SFR. A aplicação específica do programa em SFC para o controle do SFR é também uma abertura de horizontes de inspiração para aplicação dessa linguagem na automação de sistemas como esse, visto a facilidade de programação e manutenção encontrada e a perfeita adequação da linguagem para o controle desse tipo de sistema, a partir da sistemática proposta.

## **Trabalhos Futuros**

Como trabalhos futuros, podemos elencar temas que podem aprofundar a especificação formal da arquitetura de controle a ser utilizado em SFRs.

Neste caso podemos citar como tema o estudo de uma sistemática para cálculo de scan-time de *mão dupla*, isto é, verificar o seu dimensionamento a partir da verificação das constantes de tempo do processo inerente à natureza do SFR e por outro lado, dimensionar o custo computacional de execução das instruções do algoritmo de controle para se dimensionar o esforço computacional que o CP terá que realizar. Estes critérios podem ser explicitados a partir de regras implementado em um SI apropriado para auxiliar no projeto de arquiteturas de controle.

Outro tema interessante é o estudo de um método para definir-se a arquiteturas de controle distribuído aplicando-se a norma IEC61499 em que poderíamos levar em conta o custo da implantação de módulos de I/Os remotas e de diversos PCs em uma arquitetura hierárquica e distribuída.

Por fim, poderíamos sugerir também o estudo de um projeto de integração do sistema de controle aqui estudado com um sistema de controle supervisório capaz de tratar detecção ediagnóstico de possíveis falhas para tornar o sistema robusto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAKAKI, J. **Análise de Sistemas de Manufatura através da Metodologia PFS/MFG e Regras de Produção**, dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993.

BILLINGTON, J. ET AL. **The Petri Net Markup Language: Concepts, Technology and Tools**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.

JUNQUEIRA, FABRICIO. **Modelagem e Simulação Distribuída de Sistema Produtivo Baseados em Redes de Petri**. Revista Controle & Automação. Vol.20 , 2009

MARRANGHELLO, NORIAN. **Redes de Petri: Conceitos e Aplicações**. DCCE/IBILCE/UNESP, São Paulo, 2005.

MICHEL,GILLES. **Programmable Logic Controllers: Architecture and Applications**, Wiley, England, 1990.

MIYAGI, P. E. **Controle Programável – Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos**. Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1996.

MIYAGI, P. E. **Introdução a Simulação Discreta**. Artigo Técnico. Escola Politécnica, São Paulo, 2006.

SANTOS F., D. J. **Aspectos de Projeto do Controle de Sistemas Produtivos**, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 07/2000.

SANTOS F., D. J. **Proposta do Mark Flow Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura**. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1993.

SILVA, MANUEL. **Las Redes de Petri en La Automática y La Informática**. Editora AC,1985

ZHOU M; DICESARE, F. **Petri Nets Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems**. Kluver A. Pub., 1993.

## ANEXO A – Redes de Petri

Há várias maneiras possíveis de se classificar as RdP, uma maneira muito utilizada, a qual empregaremos neste texto, consiste em agrupá-las quanto ao seu grau de abstração. Neste caso, pode-se separá-las em RdP de baixo nível e de alto nível.

As RdP de baixo nível são aquelas cujo significado de suas marcas não são diferenciáveis a não ser pela estrutura da rede à qual estão associadas. Elas ainda podem ser subdivididas em elementares e lugar/transição. As redes elementares são aquelas que conservam as características das redes propostas por Petri, em sua tese de doutorado. Elas são extremamente restritivas do ponto de vista de modelagem, pois permitem a existência de apenas uma marca em cada elemento da rede forçando, desta forma, a representação das nuances de um sistema modelado totalmente por meio dos elementos estruturais da rede. As redes lugar/transição buscam minimizar este esforço de modelagem relaxando um pouco as restrições impostas nas redes elementares, fundamentalmente, permitindo a utilização de mais de uma marca em cada elemento da rede, conforme será estudado mais adiante. Este foi o tipo de rede mais utilizado na década de setenta, por permitir uma compactação razoável dos modelos.

As redes de alto nível são aquelas cujas marcas incorporam alguma semântica, viabilizando sua diferenciação. Esta semântica pode ir desde a atribuição de valores ou cores às marcas, até a adoção de noções de tipos de dados abstratos, conferindo-lhes um grande poder de expressão.

Além destas categorias têm-se extensões as quais podem ser associadas a qualquer uma delas. As principais extensões visam a inclusão de hierarquias e de aspectos temporais às RdP. As extensões temporizadas referem-se àquelas que incorporam aspectos temporais determinísticos aos modelos. As extensões estocásticas, por sua vez, incorporam-lhes aspectos temporais não determinísticos. As extensões hierárquicas têm por objetivo permitir a

representação de modelos de sistemas complexos de forma mais compreensível pelo modelador. Via de regra as extensões hierárquicas não aumentam o poder de representação das RdP, apenas tornam mais fácil para o usuário a compreensão das redes resultantes.

### Noções Fundamentais:

São três os elementos básicos que formam a estrutura topológica das RdP, quais sejam: estados; ações; e relação de fluxo. Estes elementos bem como alguns conceitos relacionados a eles são discutidos nesta seção.

- Estados são usados para modelar componentes os componentes passivos dos sistemas, isto é, correspondem às suas variáveis de estado, formando um conjunto  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ .
- Ações são usadas para modelar os componentes ativos dos sistemas, ou seja, os eventos que levam o sistema de um estado a outro, formando um conjunto  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ .
- Relação de fluxo é usada para especificar como se dá a transformação de um estado em outro pela ocorrência das ações no sistema. Esta relação é representada pelo conjunto  $F = \{(x,y) \in E \times A \cup A \times E\}$ .

Então a estrutura topológica de uma rede é dada por uma tripla  $R = (E, A, F)$ , que define um grafo bipartido, dirigido e conexo, com as seguintes características:

- $E \cup A \neq \emptyset$  - o grafo não é vazio e não tem elementos isolados;
- $E \cap A = \emptyset$  - seus conjuntos de estados e de ações são disjuntos;
- $F \subseteq (E \times A) \cup (A \times E)$  – a relação de fluxo está definida no universo de estados e ações, identificando a relação de vizinhança entre aquelas entidades;
- o domínio da relação de fluxo é dado por:  $D(F) = \{x \in E \cup A / \forall (x,y) \in F \rightarrow \exists y \in E \cup A\}$ ;
- O contradomínio da relação de fluxo é dado por:  $CD(F) = \{y \in E \cup A$

$$/ \forall (x,y) \in F \rightarrow \exists x \in E \cup A\}.$$

- $D(F) \cup CD(F) = E \cup A$  – a união de domínio e contra domínio da relação de fluxo corresponde ao universo de estados e ações da rede.

Existe uma notação gráfica adequada para a representação dos elementos das RdP. Esta notação determina que:

- os estados são representados por elipses;
- as ações são representadas por retângulos; e
- os elementos da relação de fluxo por setas.

Vale notar que tradicionalmente, em alguns modelos, estas figuras geométricas são degeneradas, sendo os estados representados por círculos e as ações por barras ou quadrados. No caso das redes lugar/transição, por exemplo, utilizam-se círculos e barras. Em outros casos, como algumas redes estocásticas, as ações podem ser representadas tanto por barras quanto por retângulos, para diferenciar ações com disparo imediato de ações com disparo temporizado.

Então, uma rede cuja representação algébrica é dada por:

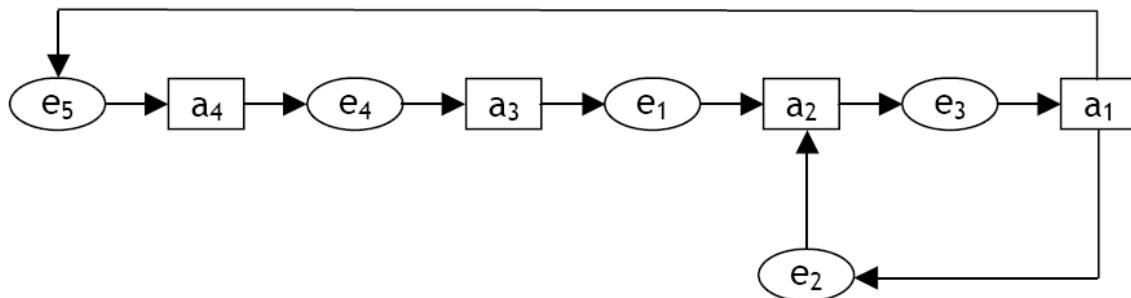
$$R = (E, A, F)$$

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$$

$$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$$

$$F = \{(e_1, a_2), (e_2, a_2), (e_3, a_1), (e_5, a_4), (e_4, a_3), (a_2, e_3), (a_3, e_1), (a_1, e_2), (a_4, e_4), (a_1, e_5)\}$$

É representada graficamente como mostra a Figura-A1.



**Figura A 1 - Representação gráfica de uma rede de Petri**

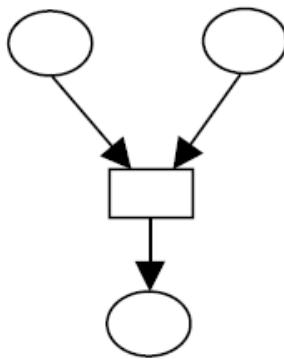
### **Definições:**

- Estados e ações são noções concomitantemente interdependentes e distintas.
- Estados e ações são entidades distribuídas.
- Um caso é um subconjunto de estados, distribuídos pela rede e satisfeitos simultaneamente.
- Um passo é um subconjunto de ações, distribuídos pela rede e que podem ocorrer simultaneamente.
  - As alterações provocadas por uma ação são fixas e independentes do caso no qual ela ocorre.
  - A ocorrência de um estado é representada graficamente por uma marca (·) colocada dentro da elipse correspondente.

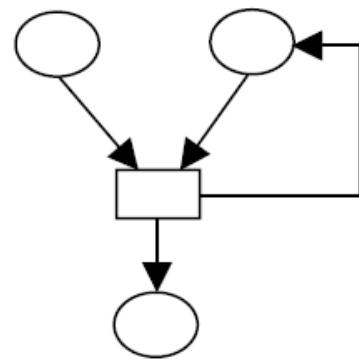
Sendo  $\delta \in \Delta = E \cup A$  ( $\delta$  é um estado ou uma ação da rede) um elemento da rede  $R = (E, A, F)$ , seus elementos de entrada são dados pelo seu pré-conjunto, representado por  $\cdot \delta = \{x \in \Delta / (x, \delta) \in F\}$ , e seus elementos de saída são dados por seu pós-conjunto, representado por  $\delta \cdot = \{y \in \Delta / (\delta, y) \in F\}$ .

- Uma ação pode ocorrer em um determinado instante se e somente se as alterações provocadas pela ação são possíveis no caso considerado.

Uma rede é dita pura se e somente se  $\forall \delta \in \Delta, \cdot \delta \cap \delta \cdot = \emptyset$ , isto é, se não contiver laços, como exemplificado na Figura-2.



Rede Pura



Rede Impura

**Figura A 2 - Exemplo de rede de Petri pura**

### Concessões

Diz-se que uma ação  $a$  pode ocorrer em um caso  $C$  se, e somente se, todas as pré-condições de  $a$  estiverem satisfeitas em  $C$  e nenhuma pós-condição de  $a$  for satisfeita em  $C$ .

$$C[a] \Leftrightarrow \exists \cdot a \subseteq C \wedge a \cdot \cap C = \emptyset$$

- Por extensão, um passo  $P$  pode ocorrer em um caso  $C$  se, e somente se, todas as ações elementares de  $P$  puderem ocorrer individualmente em  $C$ , sem causarem interferências umas nas outras.

$$P = \{ai / ai \in A \wedge P \subseteq A\} \rightarrow C[P] \Leftrightarrow \forall ai \in P, C[a]$$

### Efeito de ocorrência

- Quando uma ação  $a$  ocorre em  $C$  suas pré-condições perdem a validade, suas pós-condições passam a existir e o restante do caso permanece inalterado.

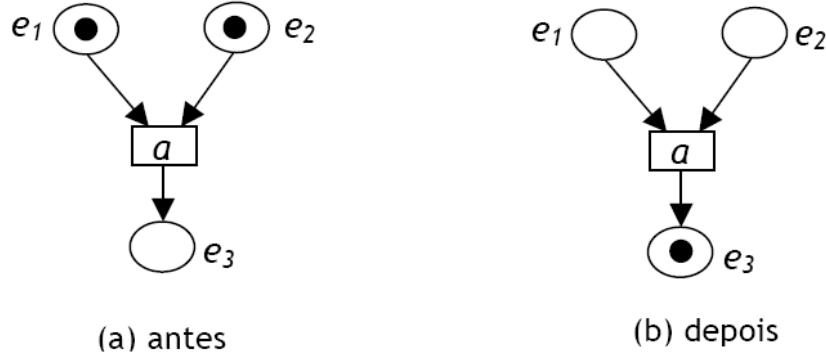
$$C[a] \Rightarrow C' = (C \setminus \cdot a) \cup a \cdot$$

- Por extensão, o resultado de ocorrência de um passo  $P$  no caso  $C$  é a soma dos resultados individuais das ocorrências das ações elementares do passo no caso considerado.

$$P = \{ai / ai \in A \wedge P \subseteq A\} \rightarrow C[P] \Rightarrow C' = (C \setminus \cdot P) \cup P \cdot$$

- Seja a ação  $a$ , com pré-condições  $e_1$  e  $e_2$  e com pós-condição  $e_3$ , considerando a ação habilitada neste caso, representa-se a concessão da ação  $a$  com as marcas em  $e_1$  e  $e_2$  (como na Figura-3a) e o efeito de sua ocorrência pela retirada das marcas de  $e_1$  e  $e_2$  e pela adição de uma marca em  $e_3$  (como na Figura-3b).

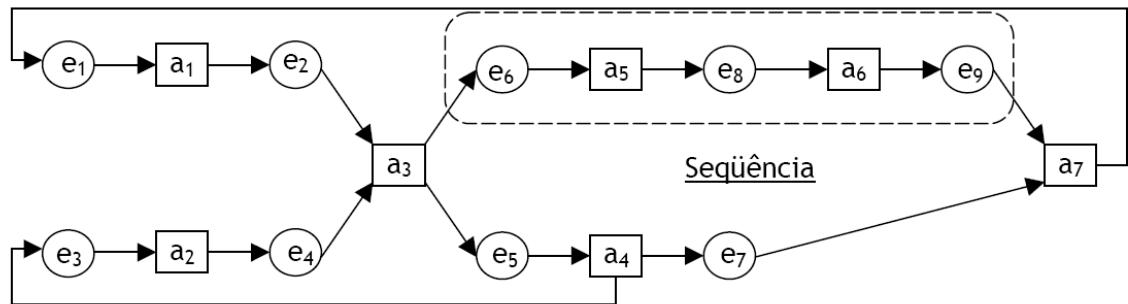
$$\cdot a = C = \{e_1, e_2\} \wedge a \cdot = \{e_3\} \rightarrow C' = C \setminus \{e_1, e_2\} \cup \{e_3\} = \{e_3\}$$



**Figura A 3 -Efeito de concorrência de uma ação**

### Conflito

Dizemos que  $a_1$  e  $a_2$  estão em conflito em um caso  $C$  se, e somente se,  $a_1$  e  $a_2$  podem ocorrer individualmente no caso  $C$ , mas não podem ocorrer simultaneamente. Portanto,  $\{a_1, a_2\}$  não é um passo no caso  $C$ . Não sendo possível dizer qual das ações ocorrerá primeiro, antes da execução do sistema, pode-se dizer que a rede elementar não é determinística. Um exemplo de conflito é mostrado na Figura-5.

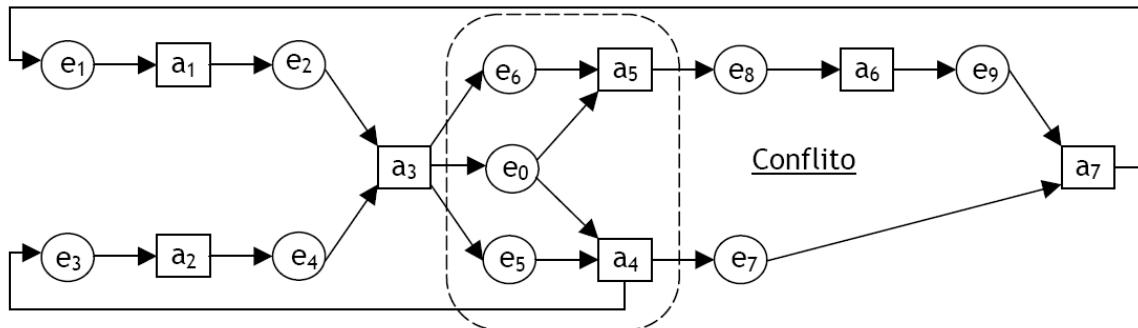


$$\{e_5, e_6\} [a_5 > \{e_5, e_8\} \wedge \neg (\{e_5, e_6\} [a_6 >]) \wedge \{e_5, e_8\} [a_6 >]$$

**Figura A 4 -Exemplo de situação de conflito**

## Concorrência

Dizemos que  $a_1$  e  $a_2$  podem ocorrer concorrentemente em um caso  $C$  se, e somente se, não sofrerem interferência mútua. Não há uma ordem especificada para a ocorrência das ações que compõem o passo habilitado em  $C$ . Então a ocorrência das ações e os estados delas resultantes serão parcialmente ordenados, donde redes elementares podem exibir comportamento não seqüencial. Um exemplo de concorrência é mostrado na Figura-6.



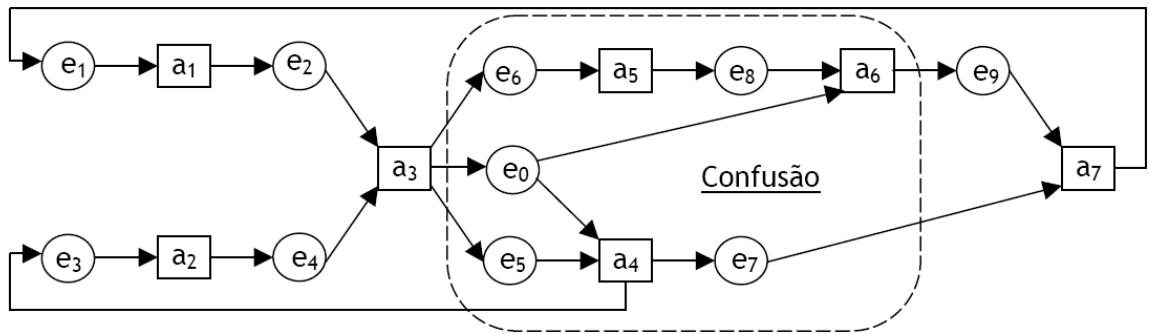
$$\{e_0, e_5, e_6\} [a_4] \wedge \{e_0, e_5, e_6\} [a_5] \wedge \neg(\{e_0, e_5, e_6\} [a_4, a_5])$$

**Figura A 5 - Exemplo de situação de concorrência**

## Confusão

É uma situação resultante da mistura de concorrência e conflito. Sendo  $a$  uma ação do espaço de ações com concessão em  $C$ , o conjunto de conflitos de  $a$  em  $C$ , designado por  $cfl(a, C)$ , é o conjunto de ações  $a'$  com concessão em  $C$  e que não formem passo com  $a$ , isto é,  $cfl(a, C) = \{a' \in A / C[a'] \wedge \neg(C[a, a'])\}$ .

Portanto, para quaisquer duas ações  $a_1$  e  $a_2$ , com concessão em  $C_1$ , a tripla  $(C_1, a_1, a_2)$  é uma confusão em  $C_1$  se, e somente se, os conjuntos de conflito de  $a_1$  em  $C_1$  e em  $C_2$  forem diferentes e a execução de  $a_2$  em  $C_1$  resultar em  $C_2$ . Um exemplo de confusão é mostrado na Figura-7. Observe-se que  $a_4$  e  $a_6$  estão potencialmente em conflito. Contudo, tão logo  $a_3$  seja executada,  $a_4$  estará habilitada, mas  $a_6$  não. A confusão surge porque  $a_5$ , que é concorrente com  $a_4$  e também fica habilitada após a execução de  $a_3$ , pode ser executada antes de  $a_4$ , habilitando  $a_6$  e colocando-a em conflito efetivo com  $a_4$ .



$$cfl(a_4, \{e_0, e_5, e_6\}) = \emptyset \wedge cfl(a_4, \{e_0, e_5, e_8\}) = \{a_6\}$$

A tripla  $(\{e_0, e_5, e_6\}, a_4, a_5)$  é confusão em  $\{e_0, e_5, e_6\}$  porque

$$cfl(a_4, \{e_0, e_5, e_6\}) \neq cfl(a_4, \{e_0, e_5, e_8\}) \wedge \{e_0, e_5, e_6\} \not\models [a_5] \{e_0, e_5, e_8\}$$

**Figura A 6 - Exemplo de situação de confusão**

## ANEXO B – Sequential Function Chart (SFC)

Sequential Flow Chart ou SFC é um modelo de representação gráfica adequada principalmente para o Controle Seqüencial caracterizado por:

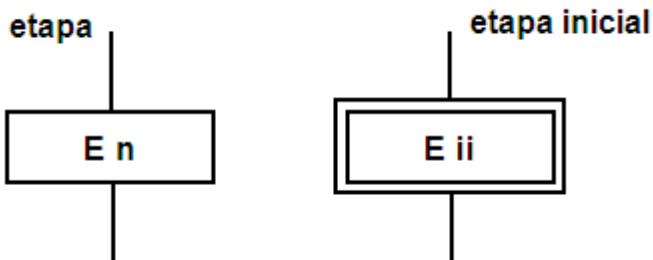
- *Steps* = etapas, condições
- *Transitions* = transições, eventos.
- *Actions* = ação, atuação.
- *Arcos orientados* = normalmente de cima para baixo.
- *Receptividade* = lógica combinatória.

Foi desenvolvido com base no MFG (Mark Flow Graph) e GRAFCET (Graphic de Commande Etape-Transition).

### Etapas

Representam os passos da seqüência a serem percorridos durante a evolução dinâmica do sistema.

São representadas por quadrados onde se inscreve números mais letras



para identificação.

**Figura B 1 - Etapas**

A etapa pode permanecer em um dos dois estados lógicos: ON (ativa) ou OFF (inativa).

Uma etapa é conectado a outro etapa por arcos orientados, separados por uma transição.

O estado do processo é determinado em qualquer instante pelo conjunto de etapas ON e pelos valores das variáveis internas e de saída destas etapas.

## Arcos Orientados

Normalmente o fluxo da seqüência é vertical, de cima para baixo.

Caso seja diferente, é necessário indicar por uma seta que indica o sentido do arco explicitamente.

## Transições

A *transição* é representada por um traço horizontal (perpendicular) ao arco.

Quando existem uma (ou mais) *etapas* conectados através de *arcos* a uma (ou mais) *etapas*, a *transição* indica a condição para que o estado ON das etapas antecedentes passe para as etapas subsequentes.

## Receptividade

A informação escrita ao lado da *transição* é a *receptividade* que representa a condição lógica da *transição*, permitindo que a evolução ocorra.

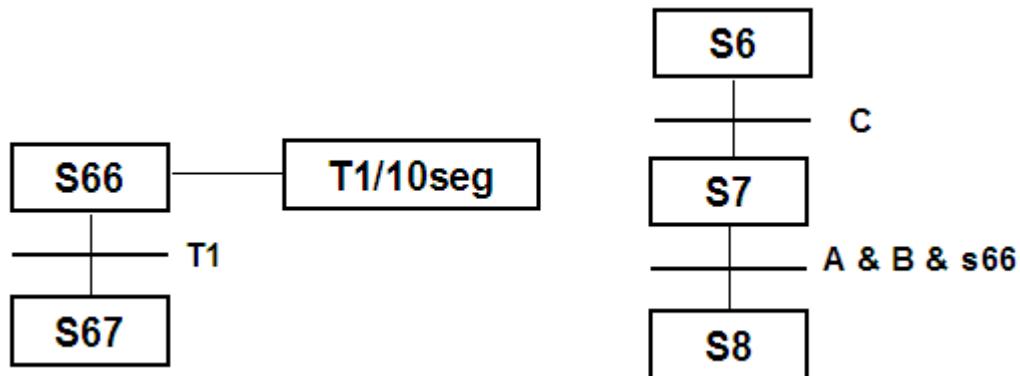


Figura B 2 - Receptividade nas transições

## Ações

Uma *etapa* pode ou não possuir *ações* que são ativadas quando a etapa fica ON.

A *ação* pode ser conectada diretamente à direita da *etapa*. A execução da *ação* ocorre sempre que a *etapa* está ON.

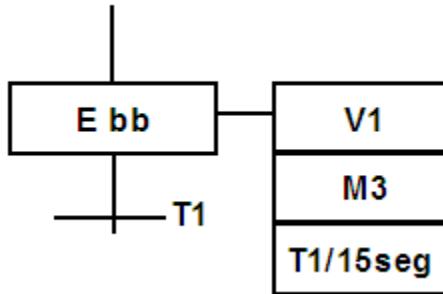


Figura B 3 - Representação das ações junto aos steps

### Tipos de Atuação

Atuação a nível: mantém ação enquanto a etapa estiver ativa.

Atuação a pulso: quando a etapa estiver ativa gera um pulso na saída.

Atuação com restrição: depende de lógica adicional.

Atuação temporizada: pode ser de um *delay* D(T) do tipo *on-delay* ou pode ser do tipo pulso limitado no tempo W.

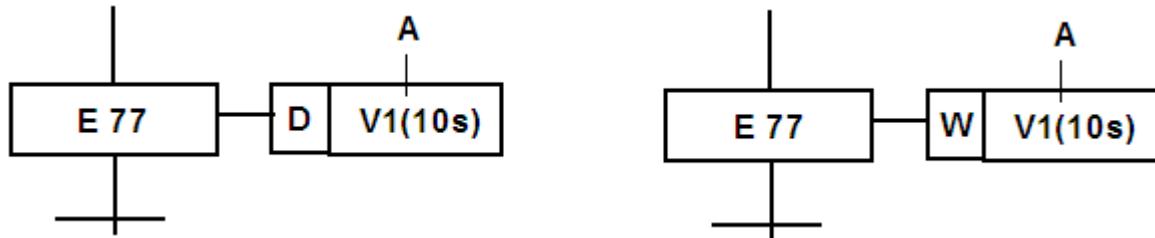


Figura B 4 - Representação de atuações em função do tempo

### Evolução do SFC

A seguir são apresentadas regras para evolução do SFC:

O estado inicial da seqüência é quando somente a etapa inicial está ON e todos as demais estão OFF.

Quando todas etapas antecedentes estão em ON e as receptividades da *transition* estão satisfeitas, tem-se que:

- As etapas subseqüentes ficam ON
- As etapas antecedentes ficam OFF

Quando existe apenas uma transição para mais de uma etapa seguinte, todos conectados por uma linha dupla horizontal e a regra de evolução da seqüência é satisfeita, todos as etapas posteriores ficam ON simultaneamente.

Este é o início de **seqüências em paralelo**.

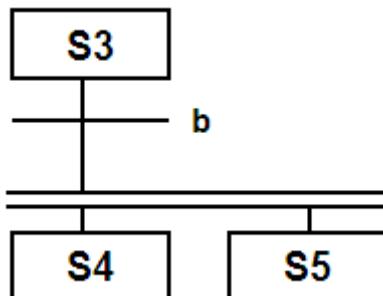


Figura B 5 - Representação de início de seqüências em paralelo

Quando existe apenas uma transição para mais de uma etapa antecedente, todos conectados por uma linha dupla horizontal, a seqüência evolui quando todos as etapas anteriores estiverem ON e a receptividade da transição for satisfeita.

Este é o fim de **seqüências em paralelo**.

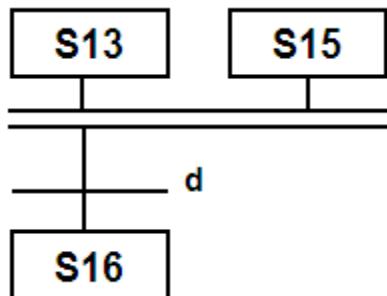
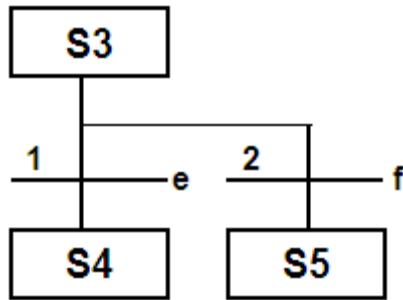


Figura B 6 - Representação de fim de seqüências em paralelo

Quando para uma etapa existem vários pares de transições e etapas posteriores e esta etapa está ON, a seqüência evolui para a etapa que tiver a sua receptividade de transição satisfeita.

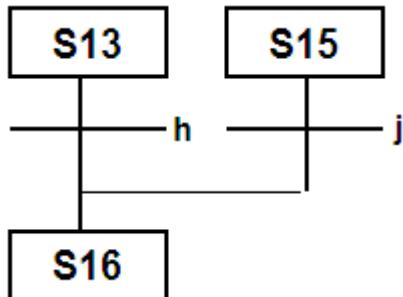
Caso exista mais de uma condição satisfeita, segue-se uma ordem de preferência pré-determinada e, se não existe uma preferência pré-definida, escolhe-se o da esquerda. Este é o início de uma **seqüência exclusiva**.



**Figura B 7 - Representação de início de sequências exclusivas**

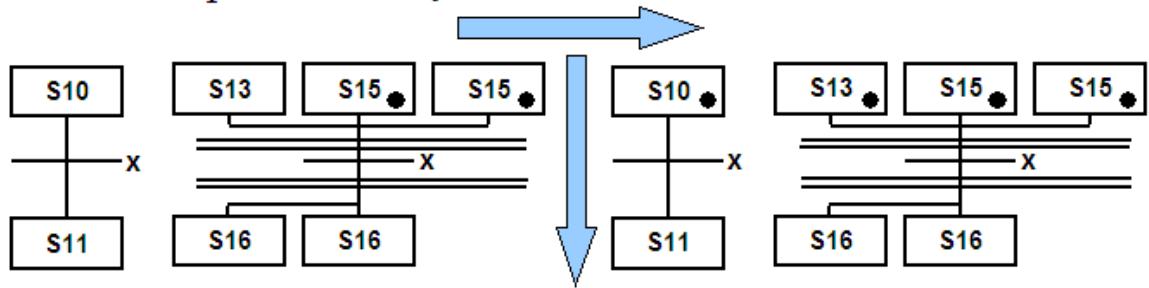
Quando para uma etapa existem vários pares de *transições* e *etapas* anteriores, a seqüência evolui da etapa que estiver ON e tiver a sua condição de *transição* satisfeita.

Caso exista mais de uma condição satisfeita, segue-se uma ordem de preferência pré-determinada e, se não existe uma preferência pré-definida, escolhe-se o da esquerda. Este é o fim de uma **seqüência exclusiva**.



**Figura B 8 - Representação de fim de sequências exclusivas**

## Exemplo de evolução de um SFC.



Onde, ● indica um step em ON ou que as condições de transição estão atendidas.

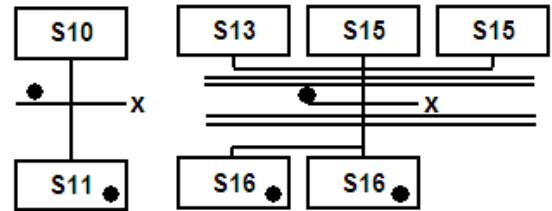


Figura B9 Dinâmica de um grafo SFC.

## Hierarquização

O SFC permite sem dificuldades a representação hierárquica e um projeto *top-down* da seqüência a nível funcional. Inicialmente descreve-se a seqüência em nível funcional e em seguida, detalha-se as etapas do SFC.