

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

***SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE UM CICLO
DE TESTES DE UM MÓDULO DE
BOMBEIO SUBMARINO***

RICARDO VIANNA RAMOS

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Maio de 2011

***SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA UM CICLO
DE TESTES DE UM MÓDULO DE BOMBEIO
SUBMARINO***

RICARDO VIANNA RAMOS

*PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.*

Aprovado por:

MARCOS VICENTE DE BRITO MOREIRA, D. Sc.
(Orientador)

SERGIO SAMI HAZAN, Ph. D.

OUMAR DIENE, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Maio de 2011

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de viver e por me dar força para sempre seguir em frente.

Aos meus pais, João e Jupira pelo esforço e dedicação que tiveram para educar a mim e meus irmãos. Pelo amor, carinho, preocupação, sempre me apoiando e orientando nas minhas decisões.

Aos meus irmãos, Fábio e Renata, por sempre estarem ao meu lado desempenhando como ninguém o papel de irmão e irmã.

A minha noiva Michele, por todo o carinho, apoio, incentivo e companhia em todos esses anos juntos.

Aos meus sobrinhos, Fábio e João que são minha fonte da juventude. Ao estar com eles tenho a oportunidade de esquecer a vida e voltar a ser criança. Dando a vocês.

A todos citados acima, um agradecimento único mais que especial, pois com o amor, carinho, fé e incentivo de vocês eu pude superar a maior das minhas batalhas e hoje me considero um vencedor.

Ao Professor Marcos Moreira que com a função de Professor e Orientador, tive a oportunidade de adquirir um grande conhecimento contribuindo para minha formação profissional, meus agradecimentos pela paciência e dedicação durante o curso. Mais que um professor, tornou-se um amigo.

Aos amigos que fiz na faculdade, que espero levar essa amizade para o resto da vida, estiveram presentes em todos os momentos, tanto nos fáceis quanto nos difíceis. E se cheguei até aqui vocês tiveram uma contribuição importante.

Conteúdo

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	viii
1 Introdução	1
2 Fundamentos Teóricos de Redes de Petri	3
2.1 Conceitos básicos sobre redes de Petri	3
2.1.1 Grafo de uma rede de Petri	3
2.1.2 Marcação	5
2.1.3 Habilitação de uma rede de Petri	5
2.1.4 Disparo de uma transição	6
2.1.5 Tipos de Arcos	7
2.1.6 Redes de Petri Ordinária e Generalizada	8
2.1.7 Equação de estado	9
2.2 Redes de Petri interpretadas para controle	9
2.2.1 Rede de Petri sincronizada	10
2.2.2 Redes de Petri temporizadas	10
2.2.3 Conflitos	11
2.2.4 Definição de Redes de Petri Interpretadas para Controle	12
2.2.5 Redes de Petri interpretadas para controle com prioridade	13
2.2.6 Rede de Petri interpretadas para controle com arco inibidor	15
2.3 Conclusão	15

3	Ciclo de teste do módulo de bombeio submarino	16
3.1	Introdução aos módulos de bombeio submarinos	16
3.2	Ciclo de teste de um módulo de bombeio submarino	17
3.3	Descrição dos equipamentos	18
3.3.1	Tanques reservatórios e tanque separador	21
3.3.2	Compressor de ar	22
3.3.3	Bomba Centrífuga	22
3.3.4	Inversores de frequência (VSD)	22
3.3.5	Válvula solenóide	23
3.3.6	Válvula de alívio	24
3.3.7	Válvula isoladora	24
3.3.8	Válvula de retenção	25
3.3.9	Válvula reguladora de pressão	25
3.3.10	Bomba de duplo parafuso (Twin Screw Pump)	26
3.3.11	Grupo de geradores a diesel	28
3.3.12	Sistema de arrefecimento	28
3.3.13	Instrumentação	29
3.4	Princípio de operação do ciclo de teste	32
3.5	Conclusão	35
4	RPIC do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino	36
4.1	Procedimento para iniciar o ciclo de teste do módulo de bombeio submarino	36
4.1.1	Procedimento de injeção de água no sistema.	37
4.1.2	Procedimento de injeção de óleo no sistema	39
4.1.3	Procedimento de injeção de gás no sistema	41
4.1.4	Procedimento de partida da bomba duplo parafuso	44
4.1.5	Rede de Petri interpretada para controle do ciclo de testes do mó- dulo de bombeio submarino	46
4.2	Conclusão	46

5	Conversão da RPIC do módulo de bombeio em Ladder	50
5.1	Linguagem Ladder	50
5.1.1	Lógica de um diagrama Ladder	50
5.1.2	Elementos de um diagrama Ladder	51
5.2	Conversão da RPIC em diagrama Ladder	54
5.2.1	Módulo de iniciação de uma rede de Petri	54
5.2.2	Módulo de eventos	55
5.2.3	Módulo de condições para disparo das transições	55
5.2.4	Módulo da dinâmica das redes de Petri	57
5.2.5	Módulo das ações	57
5.3	Matrizes de incidência	57
5.3.1	Matrizes de incidência para injeção de água no sistema	57
5.3.2	Matrizes de incidência para injeção de óleo no sistema	59
5.3.3	Matrizes de incidência para injeção de gás no sistema	59
5.3.4	Matrizes de incidência para partida da bomba de duplo parafuso	60
5.3.5	Matrizes de incidência do sistema completo	61
5.4	Diagrama Ladder do sistema completo	62
5.5	Conclusão	63
6	Conclusão	64
6.1	Sugestões futuras	65
	Referências Bibliográficas	66
	A Diagrama Ladder	67
	B Lista de Tags	77

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de um grafo de uma rede de Petri.	4
2.2	Exemplo de marcação de uma rede de Petri.	5
2.3	Exemplo de marcação de uma rede de Petri com a transição t_1 não habilitada.	6
2.4	Rede de Petri antes do disparo da transição t_1	7
2.5	Rede de Petri após o disparo da transição t_1	7
2.6	Exemplo de disparo da rede de Petri com arco inibidor.	8
2.7	Rede de Petri com arco habilitador.	8
2.8	Exemplos de arco simples, inibidor, habilitador e ponderado de peso igual a 3, respectivamente.	9
2.9	Exemplo de rede de Petri com conflito estrutural.	11
2.10	Representação do fluxo de sinais e dados de um sistema de automação por uma rede de Petri interpretada para controle.	14
2.11	Exemplo de rede de Petri com prioridades definidas.	14
3.1	Ciclo de teste do módulo de bombeio submarino.	19
3.2	Ilustração de um tanque separador.	21
3.3	Ilustração de uma válvula de alívio modelo <i>Swagelok</i>	24
3.4	Ilustração do funcionamento de uma válvula de retenção.	25
3.5	Exemplo do funcionamento de uma válvula de retenção no sistema.	26
3.6	Ilustração do funcionamento de uma válvula reguladora de pressão.	27
3.7	Sentido do fluido na bomba de duplo parafuso	27
3.8	Vista isométrica de uma bomba de duplo parafuso modelo SSMPP 380-355 Flowserve.	28
3.9	Ilustração de um sensor de pressão.	30

3.10	Ilustração de um sensor de nível.	30
3.11	Exemplo de um medidor de fluxo do tipo coriolis.	31
4.1	RPIC para injeção de água.	38
4.2	RPIC para injeção de óleo.	40
4.3	RPIC para injeção de gás.	41
4.4	RPIC para partida da bomba duplo parafuso.	45
4.5	RPIC do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino.	47
5.1	Exemplo de dois rungs.	51
5.2	Contatos normalmente fechado e normalmente aberto.	52
5.3	Bobina.	52
5.4	Representação de set e reset.	52
5.5	Representação do bloco OSR.	53
5.6	Elemento compare.	54
5.7	Módulo de iniciação de uma rede de Petri.	55
5.8	Módulo de eventos.	55
5.9	Módulo de condições de disparo das transições.	56
5.10	Módulo da dinâmica das redes de Petri.	58
5.11	Módulo das ações.	59

Lista de Tabelas

3.1	Lista dos itens do ciclo de teste com seus respectivos tags	20
3.2	Lista dos sensores do ciclo de teste	29
4.1	Receptividades associadas às transições da RPIC para injeção de água. . .	39
4.2	Estados e ações associados aos lugares da RPIC para injeção de água. . . .	39
4.3	Receptividades associadas às transições da RPIC para injeção de óleo. . . .	40
4.4	Estados e ações associados aos lugares da RPIC para injeção de óleo. . . .	40
4.5	Receptividades associadas às transições da RPIC para injeção de gás. . . .	44
4.6	Estados e ações associados aos lugares da RPIC para injeção de gás.	44
4.7	Receptividades associadas às transições da RPIC para partida da bomba duplo parafuso.	45
4.8	Estados e ações associados aos lugares da RPIC para partida da bomba duplo parafuso.	45
4.9	Receptividades associadas às transições da RPIC do ciclo de testes do mó- dulo de bombeio submarino.	48
4.10	Estados e ações associados aos lugares da RPIC do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino.	48
4.11	Sinais associados às receptividades.	49

Capítulo 1

Introdução

O avanço da tecnologia para prospecção de petróleo e elevação submarina, somados com os elevados preços, têm influenciado as empresas do segmento óleo e gás a utilizar técnicas de produção de petróleo economicamente eficientes em campos, que em outras épocas, já teriam sua produção interrompida. A produção em águas profundas nos dias atuais estão em níveis muito maiores do que há 10 anos. Isso se deve ao desenvolvimento de equipamentos e técnicas para exploração e produção de petróleo em lâminas de água superiores a 2500 m de profundidade [1]. Uma dessas técnicas é o bombeamento submarino, que é composto por bombas com a finalidade de aumentar a produção do poço. Para instalar um módulo de bombeio submarino é necessário realizar testes para verificar o desempenho e simular a operação do módulo. O ciclo de teste do módulo de bombeio submarino tem essa capacidade de avaliar o desempenho do módulo de bombeio sob diversas condições de operação simulando uma operação submarina.

Junto à tecnologia desenvolvida no ciclo de teste, vêm os processos automatizados, demandando ferramentas de engenharia tanto na fase de projeto quanto na implementação. É possível citar a rede de Petri, desenvolvida por Carl Adam Petri (1926 – 2010), como sendo uma ferramenta matemática que permite, em um único modelo, a análise matemática e a simulação de sistemas a eventos discretos com uma simples visualização gráfica [2], permitindo a representação da análise do comportamento do sistema de acordo com a sequência de eventos que ocorrem.

A interação harmônica entre hardware e software é essencial para o funcionamento do sistema. A proposta deste trabalho é projetar um sistema de controle automático

de um ciclo de teste para um módulo de bombeio submarino, utilizando redes de Petri interpretadas para controle [2, 3], que possuem condições de representar as entradas e saídas do sistema real, como por exemplo, leituras de sensores instalados na planta e ações de controle, respectivamente. Com a elaboração das redes de Petri interpretadas para controle, será realizada a conversão das redes de Petri para diagrama Ladder, utilizando um método de conversão [4].

Diagrama Ladder é uma linguagem de programação que consiste em símbolos gráficos representando contatos, bobinas, blocos temporizados, contadores e ferramentas matemáticas tais como: comparadores de igualdade e desigualdade dentre outros. Com essa ferramenta é possível realizar a programação do CLP (Controlador Lógico Programável) que são computadores robustos utilizados principalmente em ambientes industriais e são usualmente programados na linguagem Ladder. O CLP é um equipamento que é usualmente utilizado para controlar sistemas a eventos discretos (SED) e tem a capacidade de realizar a interface entre a planta e o operador, isto é, o operador através do CLP envia e recebe as informações necessárias para controlar e monitorar o sistema.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: no capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos sobre redes de Petri e suas variações, com destaque para as redes de Petri interpretadas para controle; no capítulo 3 é apresentado o ciclo de teste do módulo de bombeio submarino, seus principais componentes e seu princípio de funcionamento; no capítulo 4 é apresentada a construção das redes de Petri interpretadas para controle do ciclo de testes; o capítulo 5 mostra a conversão das redes de Petri interpretadas para controle em diagrama Ladder; e, finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e análises do trabalho e as sugestões futuras.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos de Redes de Petri

Neste capítulo são apresentados conceitos, características e definições das Redes de Petri. Na seção 2.1 são apresentados os conceitos básicos de uma rede de Petri, incluindo a sua dinâmica. Na seção 2.2 são apresentadas as redes de Petri interpretadas para controle e suas características.

2.1 Conceitos básicos sobre redes de Petri

Sistemas a eventos discretos são sistemas cujos espaços de estados podem ser representados por um conjunto de elementos discretos, com as transições dirigidas por eventos. Das diversas formas de representar um sistema a eventos discretos, a rede de Petri é uma ferramenta matemática de análise formal, que permite a visualização simultânea de sua estrutura e comportamento. As redes de Petri modelam dois aspectos do sistema: eventos e condições.

Para se definir uma rede de Petri são realizados basicamente dois passos. O primeiro deles é definir o grafo da rede de Petri ou a estrutura da rede de Petri. O segundo passo é adicionar a esse grafo uma marcação inicial.

2.1.1 Grafo de uma rede de Petri

Uma rede de Petri é um grafo bipartido ponderado, composto de dois tipos de nós denominados lugares e transições. Um lugar é representado por um círculo e uma transição por uma barra. Arcos orientados conectam lugares a transições e transições a lugares. Os

conjuntos dos lugares e das transições são finitos e não vazios. Um grafo de uma rede de Petri pode ser definido de acordo com a definição 1.

Definição 1 [2] *A estrutura de Petri, ou grafo de Petri, é definida como um grafo bipartido ponderado, (P, T, A, w) sendo:*

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ o conjunto finito de lugares;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ o conjunto finito de transições;

O conjunto de arcos de lugares para transições e de transições para lugares,

$$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$$

$w : A \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ a função de pesos associados aos arcos. □

Ao descrever uma rede de Petri, é conveniente usar as notações $I(t_j)$ e $O(t_j)$ para denotar os lugares de entrada e de saída, respectivamente de uma transição t_j . Assim:

$$I(t_j) = \{p_i \in P : (p_i, t_j) \in A\}$$

e

$$O(t_j) = \{p_i \in P : (t_j, p_i) \in A\}.$$

Na figura 2.1 é mostrado um exemplo de um grafo de Petri, em que $P = \{p_1, p_2\}$, $T = \{t_1\}$, $A = \{(p_1, t_1), (t_1, p_2)\}$, $w(p_1, t_1) = 2$, $w(t_1, p_2) = 1$. Neste caso $I(t_1) = \{p_1\}$ e $O(t_1) = \{p_2\}$

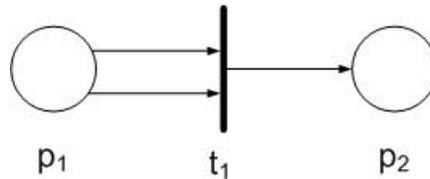


Figura 2.1: Exemplo de um grafo de uma rede de Petri.

2.1.2 Marcação

Definição 2 [2] Uma rede de Petri marcada é uma quintupla $N = (P, T, A, w, \underline{x})$ em que (P, T, A, w) é um grafo de Petri, e $\underline{x} = [x(p_1) \ x(p_2) \ \dots \ x(p_n)]^T \in \mathbb{N}^n$ é um vetor coluna que indica a marcação do conjunto de lugares de N , isto é, indica o número de fichas em cada um dos lugares $p_i, i = 1, \dots, n$, sendo $x(p_i)$ o número de fichas no lugar p_i . \square

Na figura 2.2, uma rede de Petri com a mesma configuração do grafo da figura 2.1, porém com o estado $\underline{x} = [2 \ 1]^T$, é apresentada.

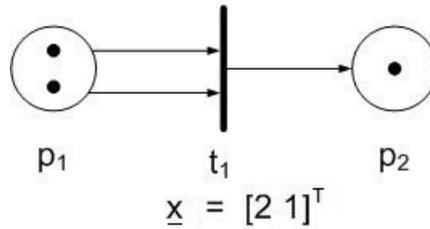


Figura 2.2: Exemplo de marcação de uma rede de Petri.

Pode-se relacionar a marcação de uma rede de Petri com o conceito de rede de Petri segura, que é explicado na definição 3.

Definição 3 Uma rede de Petri é dita ser segura se todos os seus lugares possuem no máximo uma única ficha para todos os estados alcançáveis da rede de Petri. \square

2.1.3 Habilitação de uma rede de Petri

A evolução dos estados em uma rede de Petri ocorre de acordo com o disparo das transições, sendo que para uma transição disparar é necessário que esta esteja habilitada. Para que uma transição t_j esteja habilitada é necessário que o número de fichas presente em cada um dos lugares de entrada da transição t_j seja maior ou igual ao peso dos arcos que fazem a conexão entre esses lugares e a transição t_j , ou seja, uma transição t_j está habilitada se e somente se:

$$x(p_i) \geq w(p_i, t_j), \forall p_i \in I(t_j)$$

Na figura 2.3 é mostrado um exemplo de rede de Petri onde a transição t_1 não está habilitada. Para esta transição estar habilitada seria necessário que houvesse pelo menos mais uma ficha no lugar p_1 .

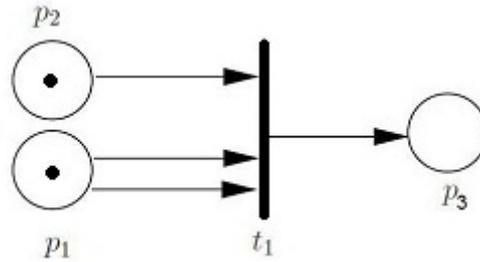


Figura 2.3: Exemplo de marcação de uma rede de Petri com a transição t_1 não habilitada.

2.1.4 Disparo de uma transição

Uma transição só pode ser disparada se estiver habilitada e o disparo de uma transição t_j consiste em retirar $w(p_i, t_j)$ fichas de cada lugar $p_i \in I(t_j)$ e adicionar $w(t_j, p_i)$ fichas em cada lugar $p_i \in O(t_j)$. Portanto, o número de fichas em uma rede de Petri não é necessariamente constante.

A figura 2.4 mostra um exemplo de rede de Petri antes do disparo da transição t_1 e na figura 2.5 é mostrada a rede de Petri após o disparo da transição t_1 . Inicialmente, os lugares p_1 e p_2 tinham duas fichas cada enquanto o lugar p_3 nenhuma. Após o disparo da transição t_1 , o lugar p_1 perde duas fichas, o lugar p_2 perde uma ficha e o lugar p_3 ganha uma ficha.

A dinâmica de uma rede de Petri pode ser definida de acordo com a equação matemática:

$$x'(p_i) = x(p_i) - w(p_i, t_j) + w(t_j, p_i), i = 1, \dots, n, (2.1)$$

sendo $x'(p_i)$ a quantidade de fichas que um lugar p_i possui após o disparo de uma transição t_j e $x(p_i)$ indica a marcação do mesmo lugar antes de ocorrer o disparo de t_j .

Os elementos $x'(p_i)$ compõem o vetor $\underline{x}' = [x'(p_1) \ x'(p_2) \ \dots \ x'(p_n)]^T$, indicando a distribuição de fichas após o disparo de cada transição.

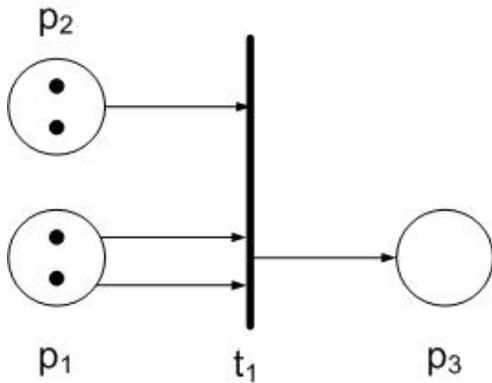


Figura 2.4: Rede de Petri antes do disparo da transição t_1 .

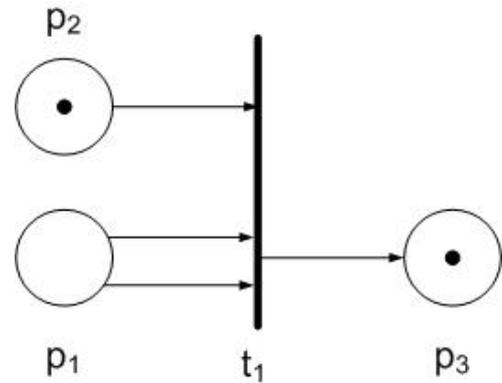


Figura 2.5: Rede de Petri após o disparo da transição t_1 .

2.1.5 Tipos de Arcos

Em redes de Petri existem diferentes tipos de arcos, que são nomeados como: arco simples, arco inibidor, arco habilitador e arco ponderado. Nesta seção são mostradas as principais características de cada tipo de arco e na figura 2.8 são mostradas as suas representações.

Arco simples

Arco simples é o mais comum dos arcos e é representado como uma seta cheia. Esse tipo de arco pode ser utilizado para conectar um lugar a uma transição ou uma transição a um lugar.

Arco inibidor

Arco inibidor é representado como uma seta cuja ponta é um círculo vazio. Esse tipo de arco somente pode ser utilizado para conectar um lugar a uma transição. Um lugar p_i conectado a uma transição t_j por um arco inibidor somente poderá disparar se o número de fichas do lugar p_i for menor que o peso do arco $w(p_i, t_j)$. Após o disparo da transição t_j , o lugar p_i não perde suas fichas. Na figura 2.6 é mostrado um exemplo de disparo realizado com o arco inibidor.

Arco habilitador

Arco habilitador é representado como uma seta vazia. Esse tipo de arco somente pode conectar um lugar a uma transição, assim como o arco inibidor. Na figura 2.7 é mostrada

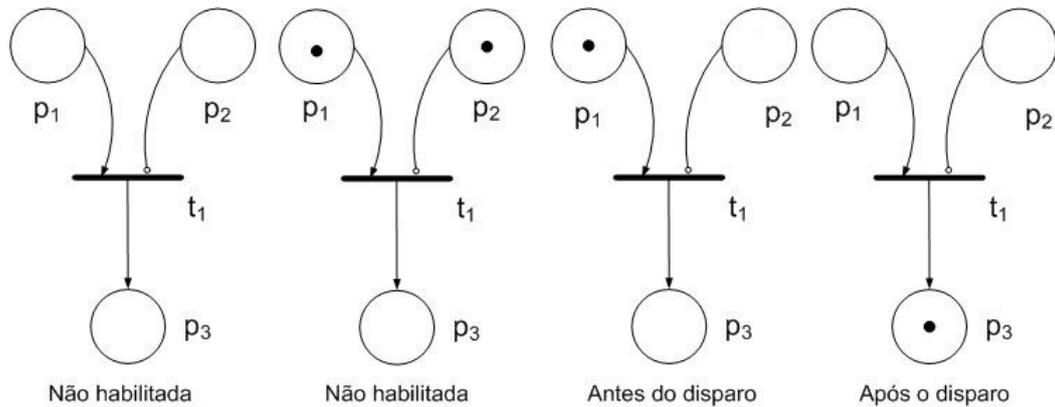


Figura 2.6: Exemplo de disparo da rede de Petri com arco inibidor.

a representação de arco habilitador. Nesse exemplo o disparo de t_1 não altera o número de fichas em p_1 , enquanto que p_2 perde uma ficha e p_3 ganha uma ficha.

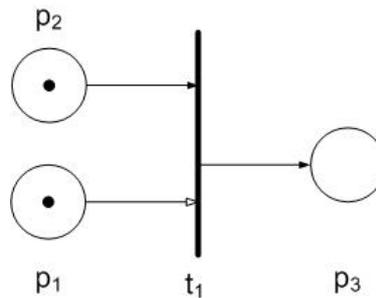


Figura 2.7: Rede de Petri com arco habilitador.

Arco ponderado

Arco ponderado tem a função de indicar que existe mais de um arco conectando um lugar a uma transição ou uma transição a um lugar, e é representado como uma seta igual ao arco simples, mas com a diferença de que ele possui uma numeração associada à ele, indicando seu peso, isto é, indicando quantos arcos estão associados à aquele arco ponderado.

2.1.6 Redes de Petri Ordinária e Generalizada

Uma rede de Petri é dita ordinária se $w(p_i, t_j) = w(t_j, p_i) = 1, \forall (p_i, t_j), (t_j, p_i) \in A$. Caso exista algum par (p_i, t_j) ou (t_j, p_i) tal que $w(p_i, t_j) > 1$ ou $w(t_j, p_i) > 1$, então a rede de Petri será denominada generalizada.

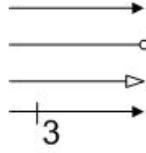


Figura 2.8: Exemplos de arco simples, inibidor, habilitador e ponderado de peso igual a 3, respectivamente.

2.1.7 Equação de estado

Segundo a definição 2.1, uma rede de Petri é um grafo bipartido ponderado, e os estados de uma rede de Petri são definidos pela marcação \underline{x} , assim uma rede de Petri marcada é definida como uma quintupla de acordo com a definição 2.2. A definição 2.3 define quando uma transição t_j está habilitada. Se a transição t_j é habilitada para uma marcação \underline{x} e o evento associado à t_j ocorre, acontece o disparo da transição t_j e um novo estado $\underline{\bar{x}}$ é alcançado. Com isso a evolução da marcação é dada pela equação (2.1):

A partir da equação (2.1), pode-se dizer que após o disparo de uma transição t_j o vetor de estados pode ser representado como uma equação em espaço de estados:

$$\underline{\bar{x}} = \underline{x} + W\underline{u},$$

em que \underline{u} é um vetor coluna formado por zeros, com exceção do j -ésimo elemento que representa o disparo da transição t_j , com valor igual a 1 e W é a matriz de incidência $m \times n$, dada por:

$$W = W_{out} - W_{in},$$

em que $W_{in} = [w_{ij}^{in}]$, com $[W_{ij}^{in}] = w(p_i, t_j)$ é a matriz de incidência de entrada e $W_{out} = [w_{ij}^{out}]$, com $[W_{ij}^{out}] = w(t_j, p_i)$ é a matriz de incidência de saída.

2.2 Redes de Petri interpretadas para controle

As redes de Petri interpretadas para controle são capazes de representar o controlador de um SED, por exemplo, quando uma transição habilitada somente é disparada quando um evento ocorre e se determinadas condições predeterminadas forem verdadeiras. Isso significa que uma rede de Petri é capaz de realizar interfaces com sensores e atuadores espalhados pelo sistema proposto. Nas redes de Petri interpretadas para controle os lugares

possuem uma função de ação ou operação além da função de representar as condições do sistema.

A seguir são apresentadas as redes de Petri sincronizadas, temporizadas e com conflito. São mostradas também a definição das redes de Petri interpretadas para controle e redes de Petri interpretadas para controle com prioridades.

2.2.1 Rede de Petri sincronizada

Em uma rede de Petri, uma transição habilitada é considerada como uma transição que pode ser disparada, ou seja, uma vez habilitada uma transição t_j pode disparar. Em uma rede de Petri sincronizada, o disparo de uma transição t_j depende de sua habilitação e da ocorrência de um evento externo associado à transição t_j .

Definição 4 [3] Uma rede de Petri sincronizada é uma tripla $(R, E, Sync)$ em que: R é uma rede de Petri marcada; E é o conjunto de eventos externos; $Sync : T \rightarrow E \cup \{e\}$ é a função de sincronização que associa a cada transição um evento externo ou o evento que sempre ocorre. \square

O conjunto de eventos externos é denotado por $E = \{e^1, e^2, \dots\}$. A notação utilizada para os eventos externos é e^j . Quando uma transição t_j está associada ao evento e^j e habilitada, diz-se que t_j está receptiva ao evento e^j [3].

2.2.2 Redes de Petri temporizadas

As redes de Petri temporizadas possuem uma estrutura de temporização associada à sua formação. Existem dois modelos de redes temporizadas. O primeiro modelo associa tempo às transições e o segundo associa tempo aos lugares, sendo denominadas de redes T-temporizadas e P-temporizadas, respectivamente. Em redes de Petri temporizadas o atraso é representado por d , equivalendo ao disparo de uma transição no caso das redes T-temporizadas ou ao tempo de espera de uma condição no caso das P-temporizadas.

Para os casos em que não há especificação do tempo relacionado à transição ou ao lugar, é considerado tempo nulo, ou seja, não possui temporização e o disparo é realizado

assim que a transição se tornar habilitada. Neste trabalho serão abordados somente as redes de Petri T-temporizadas.

Redes de Petri T-temporizadas

As redes de Petri T-temporizadas possuem transições que podem ser associadas a atrasos de disparo. Assim, o conjunto T pode ser particionado como $T = T_0 \cup T_D$, em que T_0 é o conjunto de transições não temporizadas e T_D é o conjunto de transições temporizadas, ou seja, transições que apresentam atraso no disparo.

As redes de Petri T-temporizadas possuem uma temporização d_j associada à cada transição $t_j \in T_D$. Quando uma transição t_j está habilitada, ela não irá disparar imediatamente, o seu disparo somente ocorrerá quando o tempo d_j , iniciado no instante da habilitação, for percorrido.

2.2.3 Conflitos

Uma rede de Petri pode ter em sua estrutura conflitos entre as transições. Pode-se perceber a ocorrência de um conflito numa rede de Petri quando pelo menos duas transições possuem um lugar de entrada em comum. Existem três tipos de conflitos: estrutural, efetivo e real.

Um conflito estrutural corresponde ao conflito relacionado devido à estrutura da rede de Petri, ou seja, caso exista um lugar com pelo menos duas ou mais transições de saída. A figura 2.9 ilustra uma situação em que existe conflito estrutural entre as transições t_1 e t_2 e o lugar de entrada p_1 .

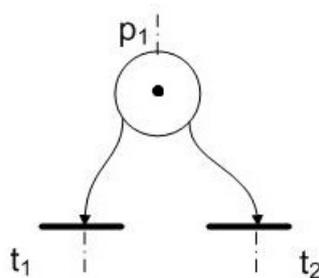


Figura 2.9: Exemplo de rede de Petri com conflito estrutural.

Um conflito efetivo além de levar em consideração a estrutura da rede de Petri

considera também o estado no momento analisado, isto é, há um conflito que depende da marcação (estado) da rede de Petri.

Um conflito real é aquele que além de levar em consideração a marcação da rede de Petri considera também os eventos e condições associados às transições. Caso ocorra a possibilidade de duas transições dispararem simultaneamente, é caracterizado um conflito real. Com isso, um conflito somente é considerado real caso exista realmente a chance de disputa por fichas em um determinado momento e os eventos e condições associadas às transições envolvidas no conflito não eliminem esse conflito.

2.2.4 Definição de Redes de Petri Interpretadas para Controle

As redes de Petri interpretadas para controle podem ser definidas como:

Definição 5 [4] Uma rede de Petri interpretada para controle é uma décupla:

$$N = (P, T, A, W, \underline{x}, E, C, D, O, Q),$$

em que $(P, T, A, w, \underline{x})$ é uma rede de Petri marcada, segura com o estado inicial \underline{x} , $T = T_0 \cup T_D$ em que T_0 é o conjunto de transições não temporizadas e T_D é o conjunto de transições temporizadas, $E = \{E_1, \dots, E_m\}$ e $C = \{C_1, \dots, C_m\}$ são os conjuntos de eventos e de condições de entrada, associados com m transições, respectivamente. $D = \{d_j : t_j \in T_D\}$ é o conjunto de atrasos de disparo associados com as transições temporizadas T_D . O e Q são os conjuntos de operações e ações booleanas ou impulsivas associadas aos lugares, respectivamente.

□

É possível perceber que as transições temporizadas não apresentam associações a eventos e condições, estando seu disparo associado somente à habilitação e a temporização. Portanto, uma transição temporizada $t_j \in T_D$ quando habilitada dispara após percorrido o tempo de atraso d_j . Outro ponto importante sobre a definição 5 é que toda transição não temporizada tem um evento e uma condição associados, ou seja, se o evento e_j não for especificado, então $e_j = e$, evento que sempre ocorre, e se a condição c_j não for especificada, então $c_j = 1$, isto é, a condição c_j é verdadeira.

Ações booleanas, presentes na definição 5, são ações que permanecem sendo executadas somente enquanto o lugar correspondente estiver marcado. Por exemplo, quando uma bomba permanece ligada enquanto o lugar associado à ação de ligar a bomba possui uma ficha, e é desligada quando esse lugar perde a ficha. Portanto não é necessário ter um outro lugar com uma ação associada ao desligamento da bomba. Uma ação impulsional, por outro lado, assume a existência de um dispositivo externo à rede de Petri que memorize o comando enviado ao sistema. Um exemplo para ação impulsional é a marcação de um lugar que pode indicar a abertura de uma válvula abrir/fechar, que permanecerá aberta mesmo que, em seguida, o lugar se desmarque. Essa válvula somente fechará quando outro lugar, associado ao fechamento da válvula, for marcado.

Com a figura 2.10 é possível verificar graficamente a interação do controlador a eventos discretos descrito pela rede de Petri interpretada para controle com os eventos externos e processamento de dados. As setas indicam o sentido do fluxo de sinais e de dados. A rede de Petri recebe informações das condições do ambiente c_j^e e os eventos externos e_j , e envia os sinais de saída para o ambiente, que são as ações q_i . O controlador a eventos discretos também envia sinais de operação o_i para o sistema de processamento de dados e recebe informações a respeito de condições internas associadas aos dados processados c_j^p .

2.2.5 Redes de Petri interpretadas para controle com prioridade

As redes de Petri interpretadas para controle com prioridades são utilizadas para eliminar conflitos. Por exemplo, caso duas ou mais transições estejam em conflito, disputando fichas como é mostrado na figura 2.9, uma prioridade pode ser definida na rede de Petri indicando qual das transições terá seu disparo efetuado. Com isso, pode-se afirmar que a rede de Petri com prioridade é determinística.

Definição 6 Uma rede de Petri interpretada para controle com prioridades é uma dupla:

$$(N, Pr)$$

em que N é uma RPIC e $Pr = \{T_{p1}, T_{p1}, \dots, T_{pl}\}$, em que l é o número de conflitos efetivos

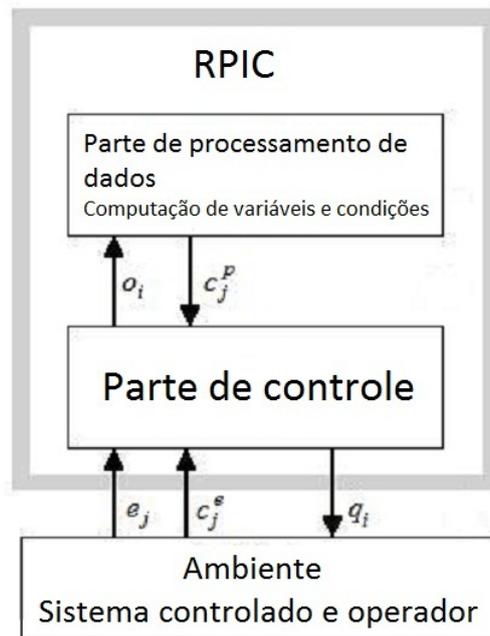


Figura 2.10: Representação do fluxo de sinais e dados de um sistema de automação por uma rede de Petri interpretada para controle.

em N e T_{pj} uma sequência de transições envolvidas em um conflito efetivo, organizadas em ordem decrescente de prioridades para o disparo. □

A figura 2.11 mostra a representação das prioridades adotadas neste trabalho. A ordem (t_2, t_1) indica que para o conflito $(p_1, \{t_1, t_2\}, \underline{x})$ a prioridade é de t_2 . Assim, caso as duas transições estejam habilitadas e possam disparar, t_2 irá disparar e t_1 não estará mais habilitada. Em relação ao conflito $(p_2, \{t_2, t_3\}, \underline{x})$, a prioridade também será de t_2 caso se defina a ordem (t_2, t_3) .

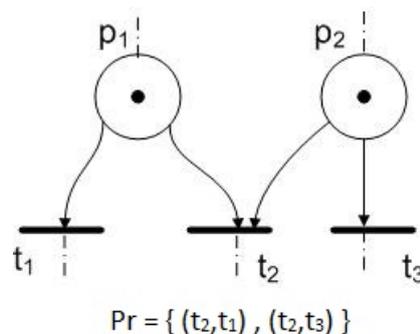


Figura 2.11: Exemplo de rede de Petri com prioridades definidas.

2.2.6 Rede de Petri interpretadas para controle com arco inibidor

Redes de Petri interpretadas para controle com arcos inibidores são também utilizadas para eliminar conflitos assim como as com prioridade. Os arcos inibidores foram mostrados na seção 2.1.5.

Definição 7 Uma rede de Petri interpretada para controle com arco inibidor é uma dupla:

$$(N, In)$$

em que N é uma RPIC e In é o conjunto dos arcos inibidores, orientados somente do conjunto dos lugares as transições, com pesos $w(p_i, t_j)$. \square

Arcos inibidores ajudam a estabelecer prioridades de disparo entre as transições. Portanto, redes de Petri com prioridades podem ser representadas com arcos inibidores.

2.3 Conclusão

Com a finalização deste capítulo é possível verificar que as redes de Petri possuem uma construção simples e é possível analisar facilmente suas representações gráficas. Vale ressaltar que nem todas as características e propriedades foram mostradas, o que mudaria o foco central do trabalho. Por isso somente foram mostradas as características que serão usadas para a construção da rede de Petri para o ciclo de testes de um módulo de bombeio submarino. No próximo capítulo será apresentado o funcionamento do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino, descrevendo o princípio de funcionamento de cada componente presente no sistema.

Capítulo 3

Ciclo de teste do módulo de bombeio submarino

Neste capítulo será descrito o funcionamento do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino e o princípio de funcionamento dos equipamentos presentes no sistema.

O capítulo está estruturado da seguinte maneira: na seção 3.1 é apresentada uma breve introdução sobre os diferentes tipos de módulos de bombeio submarinos. Na seção 3.2 é apresentada a descrição de um ciclo de teste de um módulo de bombeio submarino e os testes que podem ser realizados. Na seção 3.3 são descritos todos os equipamentos que estão presentes no sistema. E por fim, na seção 3.4, é descrito o princípio de funcionamento do ciclo de teste como um todo.

3.1 Introdução aos módulos de bombeio submarinos

Sistemas artificiais de elevação são usualmente empregados em campos de petróleo com dificuldade de surgência e/ou onde um estudo de viabilidade técnica e econômica indique sua utilização. As principais técnicas são: Gás Lift; Injeção de Água; Bombeamento Submarino.

A técnica de Gás Lift consiste em injetar gás nitrogênio, ou o próprio gás produzido no poço, para diminuir a densidade do fluido produzido e, conseqüentemente, o peso da coluna, facilitando a surgência do petróleo. Essa técnica é bastante utilizada em poços com baixa pressão de surgência.

O método de injeção de água consiste em injetar água no reservatório para estimular

a produção, visando o aumento da pressão do reservatório. Esse método é usualmente aplicado em campos maduros, ou seja, campos de petróleo antigos que não possuem pressão suficiente para elevar o petróleo produzido.

O bombeamento submarino utiliza bombas para aumentar a pressão do fluido produzido à jusante da bomba contribuindo assim para a surgência do petróleo. Tais bombas podem ser instaladas dentro do próprio poço produtor ou em furos alojadores dentro dos caissons, que são estruturas cilíndricas onde a bomba é instalada e ancorada.

Os primeiros sistemas de bombeio submarino possuíam bombas submarinas instaladas dentro dos poços produtores, o que acarretava em altos custos quando uma intervenção nesses equipamentos em caso de defeito era necessária, pois havendo necessidade de reparo na bomba, é preciso parar o poço produtor para retirar toda a coluna de produção. Com a instalação da bomba fora do poço, as empresas operadoras conseguiram eliminar esse custo adicional do sistema. A retirada da bomba pode ser realizada através de uma sonda ou cabo, a partir de um barco de apoio.

O ciclo de teste proposto neste capítulo será de fato implementado no Centro Tecnológico da FMC Technologies, localizado no Parque Tecnológico da Ilha do Fundão, Rio de Janeiro.

3.2 Ciclo de teste de um módulo de bombeio submarino

O sistema proposto deve ser capaz de monitorar e controlar um ciclo de teste para um módulo de bombeio de alta vazão e pressão. O ciclo de teste terá como funções principais: (i) avaliar o desempenho de um módulo de bombeio submarino sob várias condições de operação (ii) verificar se o módulo de bombeio está em condições de ser instalado em campo. Basicamente serão testados: diferentes viscosidades de petróleo, GVFs (Gás-Volume Fractions) e WCs (Watercuts), simulando uma operação real submarina.

Gás-volume fractions (GVF) é um termo utilizado em testes de produção, usualmente dado em termos percentuais e sua principal função é medir o volume total ocupado pelo gás nas condições testadas. É preciso calcular o volume de cada fluido na mistura multifásica.

Watercuts (WC) é outro termo usualmente utilizado em testes de produção. É a relação entre a água produzida em relação ao volume total dos líquidos produzidos. O watercut mede o teor de água de um produto específico que flui através de um tubo. É possível medir também as características diferenciais de água e outros componentes do fluido multifásico para determinar o percentual de água.

Para simular o sistema operando com diferentes viscosidades de petróleo, serão realizados testes com concentrações pré-definidas de óleo, água e gás. Pode-se operar o ciclo de teste com as seguintes combinações de fluidos: água; água-gás; água-óleo; óleo; óleo-gás; água-óleo-gás. Não é aconselhável operar a bomba apenas com gás, porque o módulo de bombeio necessita do fluido para lubrificar suas engrenagens (duplo parafuso) e também para manter uma temperatura de trabalho, visto que operando somente com gás a temperatura de trabalho tende a subir devido aos efeitos termodinâmicos relacionados à compressão do gás.

3.3 Descrição dos equipamentos

O ciclo de teste é apresentado na figura 3.1 e é composto pelos seguintes equipamentos: um tanque reservatório para água ($T01$), um tanque reservatório para óleo ($T02$), um separador trifásico para água, óleo e gás ($T03$), um compressor de ar ($C01$), duas bombas centrífugas ($P01$ e $P02$), quatro inversores de frequência variável ($VSD01$ a $VSD04$), três válvulas solenóide ($V01$, $V02$ e $V03$), uma válvula reguladora ($CV01$), quatro válvulas de alívio ($RV01$ a $RV04$), três válvulas isoladoras ($IV01$, $IV02$ e $IV03$), cinco válvulas de retenção ($CHK01$ a $CHK05$), quatro geradores diesel associados em paralelo, uma bomba duplo parafuso (*twin screw pump*) ($TSP01$), um sistema de arrefecimento composto por um Chiller condicionador de ar, bomba d'água, mangotes flexíveis e gerador dedicado, um sistema de controle constituído por PLC, HMI, instrumentação (sensores distribuídos pelo sistema) e servidor de dados, fluido hidráulico de barreira para alimentação e resfriamento do módulo de bombeio submarino e uma piscina de teste.

Algumas hipóteses serão consideradas para o ciclo de testes: (i) o grupo de geradores sempre irá fornecer a potência necessária para alimentar a bomba duplo parafuso, (ii)

os reservatórios $T01$ e $T02$ são de capacidade infinita, visto que todo o fluido que sai do reservatório retorna quando o processo de separação é terminado, (*iii*) o controle de temperatura do sistema de arrefecimento não é mostrado na planta proposta. Por ser um equipamento à parte, tem seu próprio controle e será mostrado como um item passivo (sem ações de controle sobre e a partir dele).

As válvulas de alívio e a válvula reguladora são ajustadas nos valores pré-definidos antes do teste e fixadas, não podendo ser variadas durante os testes. Válvulas de retenção e válvulas isoladoras possuem apenas funções mecânicas, não existindo nenhum controle sobre as mesmas. O ciclo de teste por questões de segurança não trabalha com hidrocarbonetos. A tabela 3.1 é a lista dos itens que fazem parte do ciclo de teste, mostrando em cada item as quantidades e os tags, que são etiquetas que auxiliam na identificação dos equipamentos do sistema.

Nas subseções a seguir cada um dos equipamentos utilizados no ciclo de teste é descrito.

Tabela 3.1: Lista dos itens do ciclo de teste com seus respectivos tags

Item	Tag	Quantidade
tanque reservatório de água	T01	1
tanque reservatório de óleo	T02	1
tanque separador	T03	1
compressor de ar	C01	1
bomba centrífuga	P01, P02	2
inversor de frequência	VSD1 a VSD4	4
válvula solenóide	V01 a V03	3
válvula reguladora	CV01	1
válvula de alívio	RV01 a RV04	4
válvula isoladora	IV01 a IV03	3
válvula de retenção	CHK01 a CHK05	5
geradores diesel	G01 a G04	4
bomba duplo parafuso	TSP01	1
sistema de arrefecimento	HE01 e HE02	1
sistema de controle		1

3.3.1 Tanques reservatórios e tanque separador

Os tanques reservatórios são componentes que têm como função principal armazenar o fluido hidráulico à pressão controlada. Seguindo requisitos de segurança, sua instalação deve ser realizada no interior de bacias de contenção para que quando ocorrer um vazamento, o descarte para o ambiente seja impedido. Sua descrição é de um tanque cilíndrico na posição horizontal, sua estrutura é em chapa de aço carbono, possui na parte inferior uma válvula onde é retirado o fluido do tanque, na parte superior há uma válvula que serve para entrada de abastecimento do fluido e uma tampa de inspeção.

O tanque separador tem como função principal realizar a separação do fluido multifásico. Sua instalação deve ser exatamente igual à do tanque reservatório. Sua descrição é de um tanque cilíndrico na posição horizontal, sua estrutura é em chapa de aço carbono, possui na parte inferior duas válvulas onde são retirados a água e o óleo já separados, na parte superior há uma válvula para entrada do fluido e outra para eliminação do gás. Sua ilustração é mostrada na figura 3.2.

Os tanques reservatórios de água e de óleo tem a função de armazenar o suprimento. Já o tanque separador têm as seguintes funções: decantação de partículas contaminantes; eliminação de gases; realizar a separação do fluido que retorna aos reservatórios de água e óleo; permitir a expansão térmica do fluido; e refrigerar o fluido.

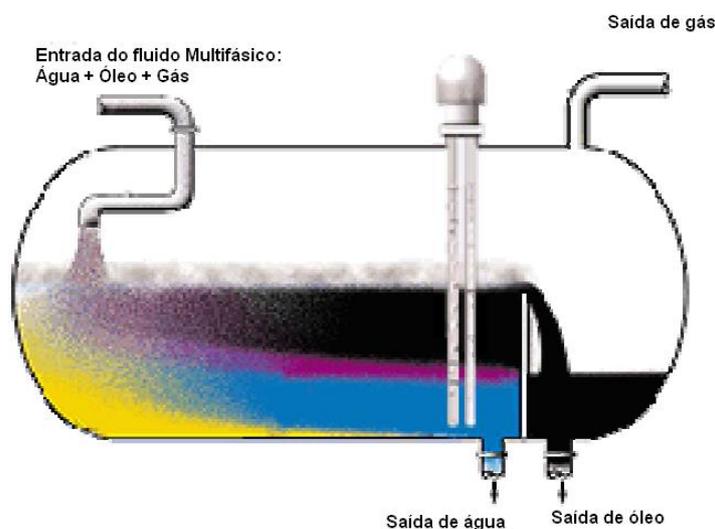


Figura 3.2: Ilustração de um tanque separador.

3.3.2 Compressor de ar

Compressores de ar são máquinas cuja finalidade é elevar a pressão de um certo volume de ar, sendo exigido na execução de trabalhos realizados pelo ar comprimido. Os compressores são classificados de acordo com o princípio de trabalho em: deslocamento positivo e deslocamento dinâmico. O deslocamento positivo é baseado na redução de volume, isto é, o ar que entra em uma câmara isolada tem seu volume gradualmente diminuído e quando a pressão ajustada é atingida, o ar é empurrado para o tubo de descarga. O deslocamento dinâmico é realizado através da conversão de energia cinética em energia potencial de pressão, isto é, o ar que entra na câmara é acelerado por impulsores geralmente de rotor laminado. Após o deslocamento, o escoamento do ar é retardado por meio de difusores resultando na elevação de pressão.

O compressor é responsável pela injeção de gás no sistema. O controle do compressor é exercido pelo VSD conectado ao PLC que é acionado de acordo com a variação de pressão da linha, medida através de um transdutor de pressão localizado à jusante do compressor.

3.3.3 Bomba Centrífuga

Por definição, bombas centrífugas são bombas que possuem como princípio de funcionamento a força centrífuga, ou seja, o rotor, composto por um eixo girante e palhetas, é fixado no centro da bomba, e faz com que o fluido vá do centro para as extremidades da bomba onde a energia cinética é transformada em energia potencial de pressão.

As bombas centrífugas são equipamentos responsáveis pela pressurização do sistema. O controle dessa bomba é exercido por um VSD conectado ao PLC, que é acionado de acordo com a variação de pressão da linha, medido através de um transdutor de pressão localizado à jusante das bombas.

3.3.4 Inversores de frequência (VSD)

Inversores de frequência (Variable Speed Drive - VSD) são dispositivos eletrônicos capazes de converter a tensão alternada senoidal CA, em tensão contínua CC de amplitude constante para finalmente converter esta última, em uma tensão de amplitude e frequência

variáveis. O torque e a velocidade de um motor de indução podem ser variados alterando-se a frequência da fonte de alimentação.

Com valores de tensão e frequência nominais o fluxo de entreferro do motor também será nominal. Em baixas frequências o valor das reatâncias cai, então as correntes tendem a se elevar. Se a frequência for aumentada acima do valor nominal, então fluxo e torque diminuem, portanto a elevação da frequência permite aumentar a velocidade acarretando na perda de torque. Porém se a relação entre a tensão e a frequência da alimentação do motor for mantida constante, não há alteração no fluxo de entreferro, de modo que o torque máximo não é alterado.

A função do VSD no ciclo de teste é realizar o controle das bombas *P01* e *P02* e do compressor *C01* permitindo que o sistema mantenha a pressão da linha constante. Independente da flutuação da demanda de vazão na bomba de duplo parafuso, o VSD tem a função de alimentar a bomba de acordo com a potência requerida pelo motor.

3.3.5 Válvula solenóide

As válvulas solenóide podem ser consideradas como "interruptores" diretamente responsáveis pela abertura e fechamento das válvulas. As características das válvulas solenóide são dadas de acordo com seu número de vias e o número de posições. O número de vias é relacionado ao número de entradas e saídas hidráulicas e o número de posições é relacionado aos estados (aberta, fechada).

As válvulas solenóide podem ser monoestáveis e biestáveis. As monostáveis utilizam um único solenóide para abertura e manutenção da válvula na posição aberta e têm seu retorno por mola para a posição fechada. É necessário manter o solenóide continuamente energizado para manter a válvula aberta. As biestáveis utilizam um solenóide para abertura e outro para o fechamento e o acionamento é feito através de um pulso elétrico no solenóide correspondente ao estado que se deseja atuar.

No ciclo de teste, as válvulas solenóide terão uma função de intertravamento, isto é, as bombas centrífugas *P01* e *P02* somente serão acionadas caso as válvulas estejam abertas. Caso contrário as bombas permanecerão desligadas e as válvulas solenóide somente fecharão quando as bombas estiverem desligadas.

3.3.6 Válvula de alívio

As válvulas de alívio são projetadas de tal forma que quando a pressão à sua montante ultrapassa valores predefinidos, a força exercida por uma mola faz com que o menor ramo se abra, permitindo o fluxo através da válvula. Na figura 3.3 é mostrada uma válvula de alívio em corte indicando suas principais partes e as setas indicam o fluxo do fluido quando aliviado.

Geralmente a válvula de alívio é ajustada para 10% acima do valor nominal da linha onde está localizada, com a função de aliviar um eventual aumento não desejado de pressão.

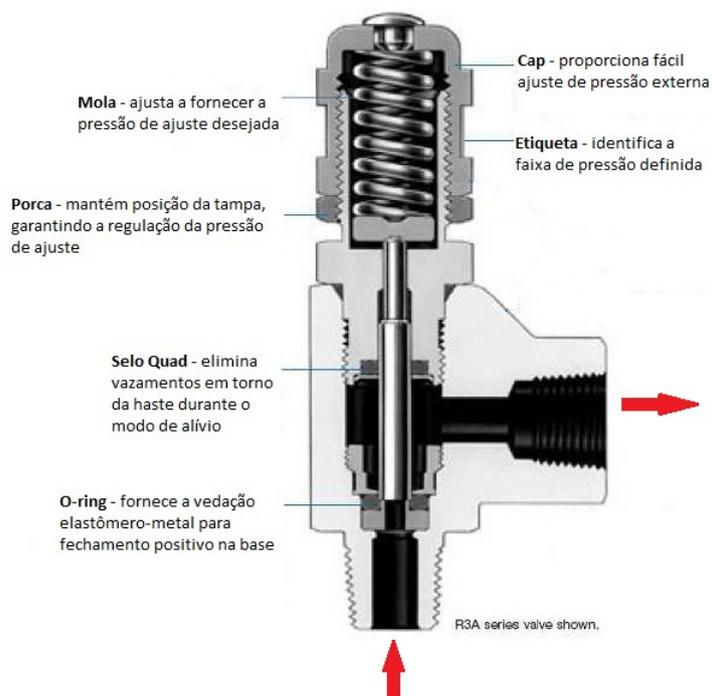


Figura 3.3: Ilustração de uma válvula de alívio modelo *Swagelok*.

3.3.7 Válvula isoladora

As válvulas mais aplicadas para funcionamento como isoladoras são as do tipo esfera. Sua principal função é bloquear ou desbloquear a linha onde está localizada, normalmente para inspeção, modificação ou manutenção, evitando que todas as linhas sejam atingidas, não havendo necessidade de paralisação de trabalho.

3.3.8 Válvula de retenção

Uma válvula de retenção é basicamente um corpo de válvula, com uma via de entrada e uma de saída e um assento móvel preso por uma mola de pressão. Geralmente este assento móvel é uma esfera.

O fluido passa somente em uma direção e quando a pressão é suficiente para deslocar a válvula que prende a esfera, esta é deslocada fazendo com que haja fluxo. Caso o fluido seja interrompido, ou exista um fluxo contrário, a esfera é empurrada para sua posição inicial fazendo com que o fluxo seja interrompido. Na figura 3.4 é mostrado um exemplo ilustrativo do funcionamento de uma válvula de retenção, na primeira imagem é mostrado a situação com fluxo na válvula de retenção e na segunda imagem é mostrado o fluxo interrompido, com o assento móvel na posição inicial impedindo que haja fluxo no sentido contrário.

A válvula de retenção terá como principal função, realizar o bloqueio do fluido de retorno, ou seja, por exemplo, suponha que a pressão d'água seja maior que a pressão de óleo e de gás. Então, como mostrado na figura 3.5, a água irá tender ao tanque reservatório de óleo e ao compressor de ar. Para que isso não ocorra, foi inserida em cada linha uma válvula de retenção para que se tenha fluxo do fluido somente em uma direção.

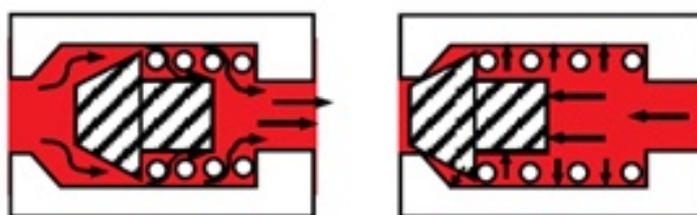


Figura 3.4: Ilustração do funcionamento de uma válvula de retenção.

3.3.9 Válvula reguladora de pressão

Geralmente as válvulas reguladoras de pressão são utilizadas para controlar a pressão dos fluidos hidráulicos. Essa válvula opera através da pressão do fluido na saída da válvula. Um regulador de pressão inclui um elemento de restrição, um elemento de carga, e um

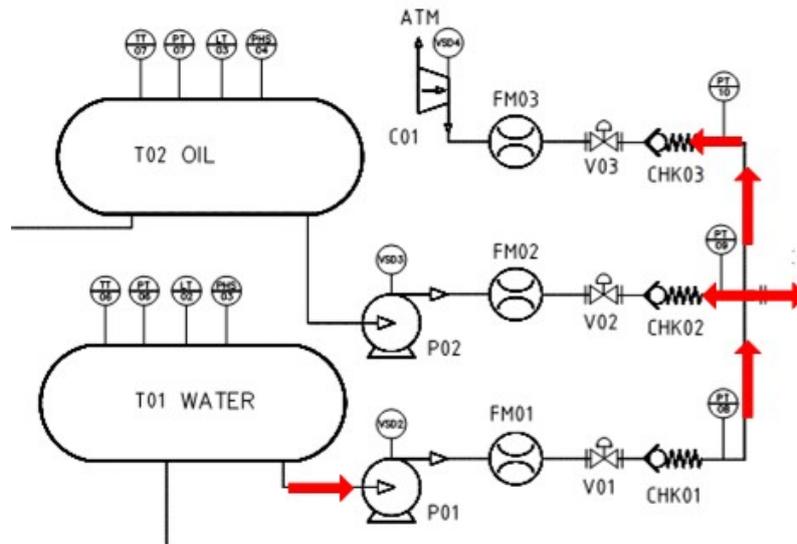


Figura 3.5: Exemplo do funcionamento de uma válvula de retenção no sistema.

elemento de medição. O elemento de restrição é uma válvula e pode ser do tipo esfera, agulha, gaveta, ou qualquer outro tipo de válvula capaz de funcionar como uma limitação de fluxo. No elemento de carga é aplicada a força necessária para o elemento de restrição, podendo ser uma mola por exemplo. O elemento de medição determina quando o fluxo de entrada é igual ao fluxo de saída. Esse elemento é um transmissor de pressão (*VPI01*) que está integrado à válvula, como é mostrado na figura 3.1.

Esse tipo de válvula é utilizada para regular o valor da pressão secundária (pressão do fluido a jusante da válvula), que é mantida constante independentemente do valor da pressão primária (pressão do fluido a montante da válvula), desde que a pressão primária seja maior que o valor ajustado para a pressão secundária. Na figura 3.6 é mostrado um exemplo ilustrativo do funcionamento de uma válvula reguladora de pressão.

3.3.10 Bomba de duplo parafuso (Twin Screw Pump)

O modelo da bomba de duplo parafuso utilizada no sistema proposto é baseada na bomba parafuso de Sier-Bath construída em 1940. Esse modelo de bomba tem sido usado em muitas aplicações para lidar com líquidos viscosos das indústrias do petróleo, petroquímica, mineração, papel e outras indústrias em geral.

O projeto utiliza dois rotores alinhados com conexão estreita entre eles. Cada rotor

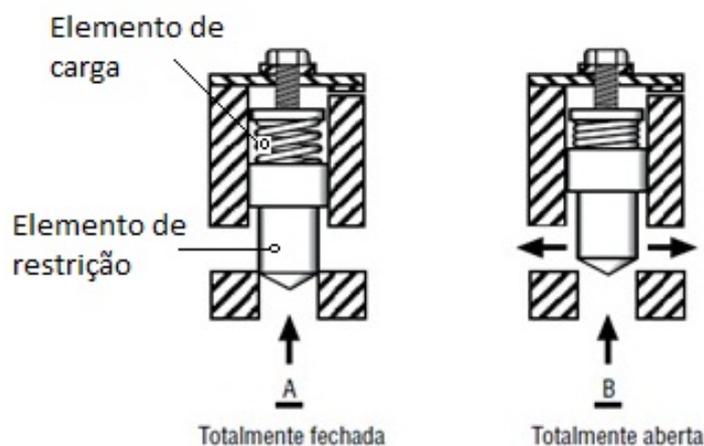


Figura 3.6: Ilustração do funcionamento de uma válvula reguladora de pressão.

está faseado em 180° , ou seja, um gira no sentido horário enquanto o outro no sentido anti-horário fazendo com que suas roscas estejam em oposição. Engrenagens de sincronismo são montadas em cada rotor para manter os rotores próximos sem que ocorra qualquer contato. Os parafusos são orientados para que o líquido bombeado a partir das extremidades do rotor em direção ao centro deixe os selos do eixo sob a pressão de sucção. Como mostrado na figura 3.7, pode-se perceber que o fluido que entra é direcionado para as extremidades, para que seja impulsionado para o centro até a saída. Rolamentos de precisão localizados no corpo do rotor mantêm a posição radial e axial dos rotores. A figura 3.8 mostra a vista isométrica em corte de uma bomba de duplo parafuso, onde é possível ver os rolamentos e os dois parafusos.



Figura 3.7: Sentido do fluido na bomba de duplo parafuso

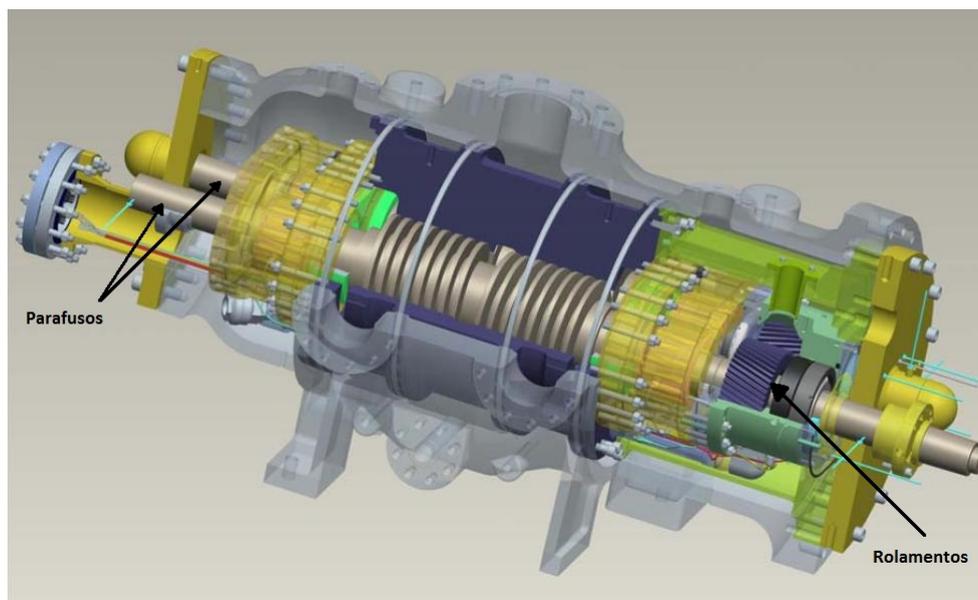


Figura 3.8: Vista isométrica de uma bomba de duplo parafuso modelo SSMPP 380-355 Flowserve.

3.3.11 Grupo de geradores a diesel

O grupo de geradores a diesel terá no sistema a função de fornecer a potência necessária para a bomba de duplo parafuso funcionar. É constituído por quatro geradores associados em paralelo, com a seguinte descrição: quatro geradores de 1.250 kVA, com tensão de 440 V e frequência de 60 Hz.

3.3.12 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento terá a finalidade de resfriar os fluidos monofásicos. O fluido que sai da bomba de duplo parafuso tem sua temperatura elevada e para que esses fluidos possam retornar ao tanque reservatório é necessário que sejam resfriados. Para isso, serão instalados trocadores de calor à jusante do tanque separador.

Os trocadores são compostos por um chiller condicionador de ar, mangotes flexíveis, uma bomba d'água e um gerador dedicado. O chiller tem a função de resfriar a água, a bomba de fazer com que a água circule e o gerador dedicado de fornecer a potência necessária para a bomba funcionar.

A água que sai do chiller resfriada é bombeada até onde estão localizadas as linhas de fluido monofásico. Pelo princípio de convecção, haverá a troca de calor, ou seja, o

fluido monofásico irá resfriar enquanto a água do sistema de arrefecimento irá esquentar. Após isso, o fluido monofásico resfriado retorna ao tanque reservatório e a água retorna ao chiller para ser resfriada novamente e dar continuidade ao ciclo de resfriamento.

3.3.13 Instrumentação

Sensores de contato serão distribuídos no ciclo de teste de acordo com a necessidade de se ter medições nos pontos desejados. Transmissores irão se comunicar com o PLC através de sinais elétricos (4 – 20 mA).

A função da instrumentação será de mostrar os valores medidos, havendo também ações de comando nos equipamentos, por exemplo, um determinado valor medido por um transmissor de pressão pode acionar ou desligar uma bomba centrífuga. A tabela 3.2 mostra a lista dos sensores que serão utilizados no ciclo de teste, os tags utilizados, as quantidades de cada sensor e o seu respectivo tipo de comunicação. Os instrumentos que serão utilizados no ciclo de teste são descritos a seguir.

Tabela 3.2: Lista dos sensores do ciclo de teste

Item	Tag	Quantidade	Comunicação
transmissor de pressão	<i>PT01aPT10</i>	10	4 - 20 mA
transmissor de temperatura	<i>TT01</i>	1	4 - 20 mA
sensor de nível	<i>LT01, LT02</i>	2	4 - 20 mA
medidor de fluxo	<i>FM01, FM02</i>	2	4 - 20 mA

Transmissor de pressão

Transmissores de pressão são baseados no princípio de piezorestividade, isto é, convertem a pressão em um sinal elétrico analógico (4 – 20 mA) proporcional e linear ao valor da pressão aplicada ao sensor. Têm a função de ler o nível de pressão na linha onde está localizado. Na figura 3.9 é mostrada uma ilustração de um sensor de pressão.

Transmissor de temperatura

Transmissores de temperatura são baseados no princípio da variação da resistência de condutores elétricos destinados a converter a temperatura em um sinal elétrico analógico



Figura 3.9: Ilustração de um sensor de pressão.

(4 – 20 mA) proporcional e linear ao valor da temperatura aplicada ao sensor. Têm como função medir o valor de temperatura na linha onde está localizado.

Sensor de nível

Medidores de nível utilizados no ciclo de teste serão do tipo bóia magnética. O medidor de nível tipo bóia magnética é aplicado em medições de níveis dos mais diversos tipos de líquidos, inclusive nos que serão utilizados no ciclo de teste. Sua montagem pode ser de forma lateral ou no topo dos tanques ou reservatórios. Os sensores encontram-se no interior da haste, não permitindo o contato do produto com a parte interna da chave. Na figura 3.10 é ilustrado um sensor de nível.

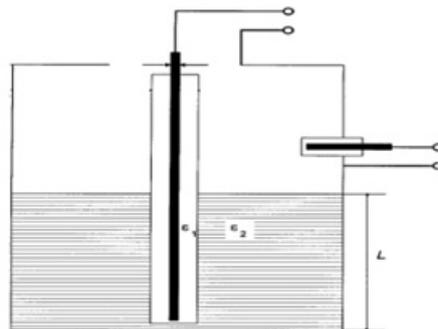


Figura 3.10: Ilustração de um sensor de nível.

Seu princípio de funcionamento é uma bóia magnética se movimentando com o nível do fluido, ao longo de uma haste. Os contatos no interior da haste são acionados com a passagem desta bóia, abrindo ou fechando os circuitos elétricos de acordo com a configuração definida pelo operador e enviando ao PLC um sinal de corrente (4 – 20 mA). No ciclo de teste o sensor de nível terá como função medir o nível dos reservatórios de

água, óleo e do tanque separador.

Medidor de fluxo

Medidores de fluxo tipo mássico coriolis utiliza o princípio Coriolis, que são ferramentas de controle de processo que permitem a medição de densidade e fluxo em líquidos, massas e gases em tempo real. Esses tipos de medidores possuem partes fixas e tubos flexíveis de aço inoxidável. Enquanto o fluido atravessa o medidor, o tubo de fluxo é vibrado e as forças Coriolis resultantes são medidas para determinar a média de fluxo mássico e densidade.

A função do medidor de fluxo no ciclo de testes será de medir o fluxo dos fluidos nas linhas a jusante das bombas centrífugas *P01* e *P02* e do compressor *C01* para assegurar que exista fluido nas linhas e que os valores estejam dentro do desejado.



Figura 3.11: Exemplo de um medidor de fluxo do tipo coriolis.

PLC, HMI

Segundo a ABNT, o PLC é um equipamento eletrônico digital com hardware e software compatíveis com aplicações industriais.

Um PLC é um controlador indicado para trabalhar com sistemas a eventos discretos. Podem também trabalhar com variáveis analógicas definidas por valores de tensão e corrente, normalmente sinais de 0 a 10 V ou 4 a 20 mA, respectivamente. O HMI é a interface para o operador. Neste trabalho não serão construídas as telas da HMI.

3.4 Princípio de operação do ciclo de teste

Para descrever o princípio de operação do ciclo de teste serão consideradas as seguintes rotinas de teste: injeção de água no sistema; injeção de óleo no sistema; injeção de gás no sistema; injeção da mistura água-óleo; e injeção da mistura multifásica água-óleo-gás.

Os quatro geradores associados em paralelo serão conectados ao VSD (*VSD01*) e sempre irão fornecer potência necessária para alimentar a bomba de duplo parafuso (*TSP01*). Conforme foi dito anteriormente, o controle de temperatura do sistema de arrefecimento não será considerado na planta proposta. As válvulas de alívio e reguladoras serão ajustadas nos valores pré-definidos antes do teste e não podem ser ajustadas no decorrer da rotina de teste.

A primeira rotina de teste é injetar água no sistema. Para iniciar a injeção de água é necessário abrir a válvula *V01*, que por ser uma válvula solenóide deve ser enviado um comando elétrico dado pelo operador do sistema e assim dar início ao processo de abertura da válvula. Para a válvula abrir por completo, deve-se esperar um determinado intervalo de tempo de acordo com o regime de operação de cada válvula. Com a válvula *V01* totalmente aberta, um sinal elétrico de retorno é enviado ao operador informando que a válvula está aberta. Esse sinal de retorno faz com que o controle permita e execute o acionamento da bomba centrífuga *P01*. Com a bomba *P01* funcionando, ela começa a retirar água do tanque reservatório *T01* e injeta no sistema. Existe um intertravamento cuja finalidade é proteger a integridade da bomba *P01*, este intertravamento consiste em acionar a bomba somente quando a válvula estiver completamente aberta.

Até o momento a bomba de duplo parafuso *TSP01* não está ligada. O seu acionamento será dado através do sinal que é enviado pelo transmissor de pressão *PT01* ao PLC. Este transmissor de pressão possui a função de monitorar a pressão na linha a montante da bomba duplo parafuso. A pressão de operação do ciclo de testes será, por questões de segurança, $500PSI$. Quando a pressão no transmissor *PT01* atingir o valor mínimo de $400PSI$ um sinal de comando será enviado ao sistema de controle que executa a partida da bomba de duplo parafuso. Com a bomba de duplo parafuso ligada, o ciclo de teste está em operação. O fluido a jusante da bomba *TSP01* está com pressão de $3.000PSI$.

Assim para fazer a redução da pressão para o valor de segurança estabelecido, $500PSI$, uma válvula reguladora de pressão $CV01$ é ajustada para fazer a redução de pressão do fluido no sistema de $3.000PSI$ para $500PSI$.

O fluido a jusante da válvula $CV01$ com pressão de $500PSI$ é então enviado ao tanque separador ($T03$). Esta etapa do processo consiste em realizar a separação do fluido multifásico, mas como nesse caso temos somente água circulando no sistema, o fluido que entra será o mesmo que sai, mantendo a pressão de trabalho de $500PSI$. Trocadores de calor, localizados a jusante do tanque separador, receberão o fluido com temperatura elevada, realizando o resfriamento para que o fluido retorne ao seu tanque reservatório com a temperatura inicial fechando o ciclo de teste.

A segunda rotina de teste é injetar óleo no sistema. A sequência de iniciação e controle é a mesma da injeção de água e por isso, não será detalhado. A única diferença está nos tags dos componentes do ciclo de teste referentes à injeção de óleo no sistema que são numericamente diferentes aos componentes de injeção de água.

A próxima rotina é fazer a injeção de gás no sistema. Como foi visto anteriormente, não é permitido testar o módulo de bombeio somente com gás devido à necessidade de fluido para lubrificar as engrenagens e evitar que a temperatura de trabalho fique em níveis elevados. Com isso, o sistema de controle não deve permitir que haja injeção de gás no sistema na ausência de algum outro fluido.

Supondo que já esteja sendo realizada a injeção de água ou óleo ou água-óleo no sistema, é possível iniciar o procedimento de injeção de gás no sistema. Para isso é necessário um comando elétrico dado pelo operador do sistema para abrir a válvula solenóide $V03$. Com a abertura total da válvula e pelo menos um fluido circulando no ciclo de teste, o compressor é ligado, dando início à injeção de gás no sistema. O controle entende que pode acionar o compressor quando recebe dois sinais de controle, um da válvula completamente aberta e outro de que pelo menos uma das duas bombas centrífugas $P01$ ou $P02$ está ligada. Caso o sistema receba somente um sinal de controle não será realizada nenhuma ação para acionar o compressor. Com a mistura multifásica (água-gás; óleo-gás; água-óleo-gás) o procedimento para acionamento da bomba $TSP01$ é o mesmo dos casos

de fluido monofásico, baseado na medição do transmissor de pressão *PT01*.

As válvulas de retenção (*CHK01/02/03*) têm a função mecânica de impedir que haja um contra fluxo. Por exemplo, caso a pressão de água seja maior que a pressão de gás, a válvula de retenção *CHK03* bloqueia o fluxo no sentido contrário, fazendo com que a água não chegue ao compressor.

As rotinas vistas anteriormente foram apenas para iniciar o ciclo de testes com os diferentes tipos de fluidos. Para encerrar as atividades do ciclo de teste, o operador poderá interferir no sistema a qualquer momento enviando um comando elétrico para que as bombas centrífugas de injeção de fluido sejam desligadas e dando início ao processo de fechamento das válvulas correspondentes. Com a bomba desligada e com a válvula fechada, a pressão na linha a montante da bomba *TSP01*, medida pelo transmissor de pressão *PT01*, cairá e quando atingir valor menor que *400PSI* a bomba *TSP01* será desligada.

Outra opção para encerrar o ciclo de teste é com valores pré-definidos para proteger a integridade das bombas centrífugas, compressores e da bomba de duplo parafuso. Supondo apenas injeção de água no sistema, caso a pressão medida no transmissor de pressão *PT08* for abaixo da margem de segurança do valor pré-definido de operação, significa que a bomba *TSP01* está consumindo mais do que a bomba *P01* pode fornecer. Se o sistema não fosse interrompido, em um certo momento a bomba *P01* iria operar em vazio elevando sua temperatura de trabalho podendo danificar seus componentes internos. Se a pressão medida no transmissor de pressão *PT08* for acima da margem de segurança do valor pré-definido de operação, significa que a bomba *P01* está fornecendo mais do que a bomba *TSP01* pode consumir, podendo acarretar numa sobrepessão que não seria seguro para o sistema. Nas duas situações supostas a bomba *P01* seria desligada e o processo de fechamento da válvula *V01* iniciado, com a diminuição da pressão no *PT01* a bomba *TSP01* seria desligada também encerrando o ciclo de teste. Esse controle é também realizado para a bomba *P02* e para o compressor *C01* seguido dos transmissores de pressão *PT09* e *PT10*, respectivamente.

3.5 Conclusão

Os conceitos abordados neste capítulo nos permitem entender o princípio de funcionamento de um ciclo de testes de um módulo de bombeio submarino, bem como os equipamentos que o compõe. Foi detalhado de forma sucinta o princípio de funcionamento, a forma de acionamento e a função de cada equipamento e sensor presente no ciclo de testes.

No capítulo 4 será apresentada a construção da rede de Petri interpretada para controle do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino.

Capítulo 4

RPIC do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino

Neste capítulo serão mostradas as técnicas de aplicações das redes de Petri interpretadas para controle apresentadas no capítulo 2. Na seção 4.1 é apresentada uma rede de Petri interpretada para controle para o procedimento de start-up do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino proposto no capítulo 3. Essa seção está dividida em quatro subseções: 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 onde são apresentadas redes de Petri para o procedimento de injeção de água, injeção de óleo e injeção de gás no sistema, respectivamente. Na subseção 4.1.4 é apresentado uma rede de Petri para o procedimento de partida da bomba duplo parafuso; e finalmente na subseção 4.1.5 é mostrada a rede de Petri interpretada para controle completa do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino.

4.1 Procedimento para iniciar o ciclo de teste do módulo de bombeio submarino

A partir da descrição do funcionamento do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino mostrada anteriormente na seção 3.4 do capítulo 3, foi obtida a rede de Petri interpretada para controle. Com a rede de Petri, foi possível dividir a planta do ciclo de teste em quatro partes, mostradas nas figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. A cada lugar é associada uma ação e às transições são associadas as condições e eventos externos. A rede de Petri do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino é composta por 20 lugares (p_1, p_2, \dots, p_{20}) e 19 transições (t_1, t_2, \dots, t_{19}). A dinâmica da rede de Petri do sistema será detalhada a

seguir.

4.1.1 Procedimento de injeção de água no sistema.

O lugar p_1 mostrado na figura 4.1 representa a válvula $V01$ fechada. Para iniciar a injeção de água no sistema é necessário um comando externo, dado pelo operador do sistema de supervisão para abrir a válvula. Esse comando dado pelo operador para abrir a válvula $V01$ é representado na rede de Petri pelo sinal $B1$, associado à receptividade $R1$ da transição t_1 .

Dado o comando externo pelo operador, o lugar p_1 perde uma ficha e o lugar p_2 ganha uma ficha. O lugar p_2 representa o regime transitório em que a válvula está sendo aberta. Com o tempo percorrido para que a válvula esteja completamente aberta, o sinal $B2$ associado à receptividade $R2$ muda de zero para 1 e o lugar p_2 com uma ficha, habilita a transição t_2 que dispara fazendo com que o lugar p_2 perca sua ficha e o lugar p_3 ganhe uma ficha. O lugar p_3 representa a válvula $V01$ completamente aberta. Com uma ficha no lugar p_3 e outra no lugar p_4 a transição t_3 está habilitada. O lugar p_4 significa que a bomba centrífuga $P01$ está desligada e se a transição t_3 estiver habilitada significa que a bomba centrífuga $P01$ está pronta para ser ligada. A transição t_3 possui associada a ela o evento que sempre ocorre, denominada em redes de Petri interpretadas para controle como e , ou seja, ela irá disparar assim que estiver habilitada, não havendo necessidade de um comando externo ou alguma outra condição do sistema. No caso do ciclo de teste, assim que os lugares p_3 e p_4 estiverem com uma ficha, a transição t_3 irá disparar. Com o disparo da transição t_3 , os lugares p_3 e p_4 perderão suas fichas e o lugar p_5 ganhará uma ficha, estando este disparo associado ao acionamento da bomba centrífuga $P01$. O lugar p_5 é associado ao comando ligar a bomba $P01$.

Com a ficha em p_5 , a bomba está ligada e injetando água do tanque $T01$ para a linha a montante da bomba parafuso. O lugar p_5 somente irá perder sua ficha caso ocorra uma das seguintes situações: a primeira é caso o operador interfira no sistema com um comando externo. Com o acionamento do operador, a transição t_4 recebe o sinal $B4$ associado à receptividade $R4$ e dispara fazendo com que o lugar p_5 perca sua ficha e os lugares p_4 e p_6 ganhem uma ficha cada, resultando no desligamento da bomba $P01$ e dando início ao

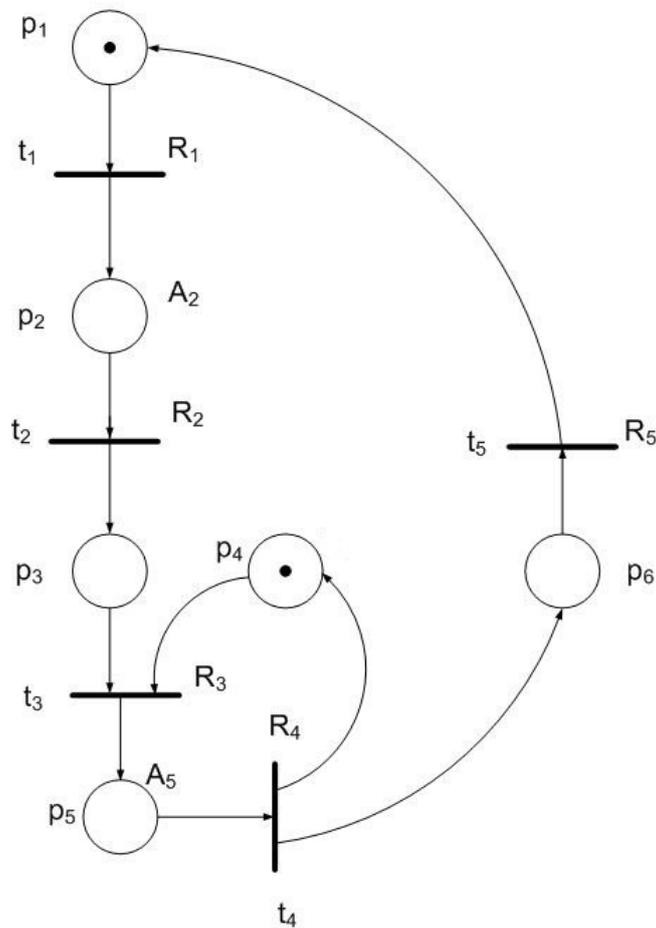


Figura 4.1: RPIC para injeção de água.

processo de fechamento da válvula $V01$. A ficha em p_6 representa o regime transitório da válvula fechando. O sinal $B5$ associado à receptividade $R5$ muda de zero para 1 e o lugar p_6 com uma ficha, habilita a transição t_5 que dispara, fazendo com que o lugar p_6 perca sua ficha e p_1 ganhe uma ficha resultando no retorno do estado inicial do sistema, com a bomba centrífuga $P01$ desligada e a válvula $V01$ fechada. A segunda condição para que o lugar p_5 perca sua ficha é uma opção de segurança do sistema para preservar a integridade da bomba centrífuga $P01$. A transição t_4 irá disparar quando ocorrer as condições de subpressão ou sobrepessão pré-configuradas. Esses dados de pressão serão coletados através do transmissor de pressão $PT08$. O disparo de t_4 nessa condição irá resultar também no desligamento da bomba centrífuga $P01$ - associado ao lugar p_4 - e início do fechamento da válvula $V01$ - associado ao lugar p_6 - retornando assim ao estado inicial do sistema. A figura da rede de Petri é mostrada na figura 4.1, seguida da tabela

de receptividades associadas às transições da rede de Petri interpretada para controle e da tabela de estados e ações associados aos lugares da rede de Petri interpretada para controle, tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1: Receptividades associadas às transições da RPIC para injeção de água.

Transições	Receptividade	Descrição
t_1	$R1$	$B1$
t_2	$R2$	$B2$
t_3	$R3$	e
t_4	$R4$	$B4 + [290 > PT08] + [PT08 > 510]$
t_5	$R5$	$B5$

Tabela 4.2: Estados e ações associados aos lugares da RPIC para injeção de água.

Lugares	Estado	Ação
p_1	Válvula $V01$ fechada	Abrir válvula $V01$
p_2		
p_3	Válvula $V01$ aberta	
p_4	Bomba $P01$ desligada	Ligar bomba $P01$
p_5		
p_6	Válvula $V01$ fechando	

4.1.2 Procedimento de injeção de óleo no sistema

O procedimento para injeção de óleo no sistema não será mostrada, pois a sequência do procedimento é a mesma do procedimento da injeção de água no sistema, visto anteriormente na seção 4.1.1. A única diferença entre as duas redes de Petri interpretadas para controle está nas numerações dos tags associados às transições e aos lugares.

A figura da rede de Petri interpretada para controle que representa a injeção de óleo é mostrada na figura 4.2, seguida da tabela de receptividades associadas às transições da rede de Petri interpretada para controle e da tabela de estados e ações associados aos lugares da rede de Petri interpretada para controle, tabelas 4.3 e tabela 4.4, respectivamente.

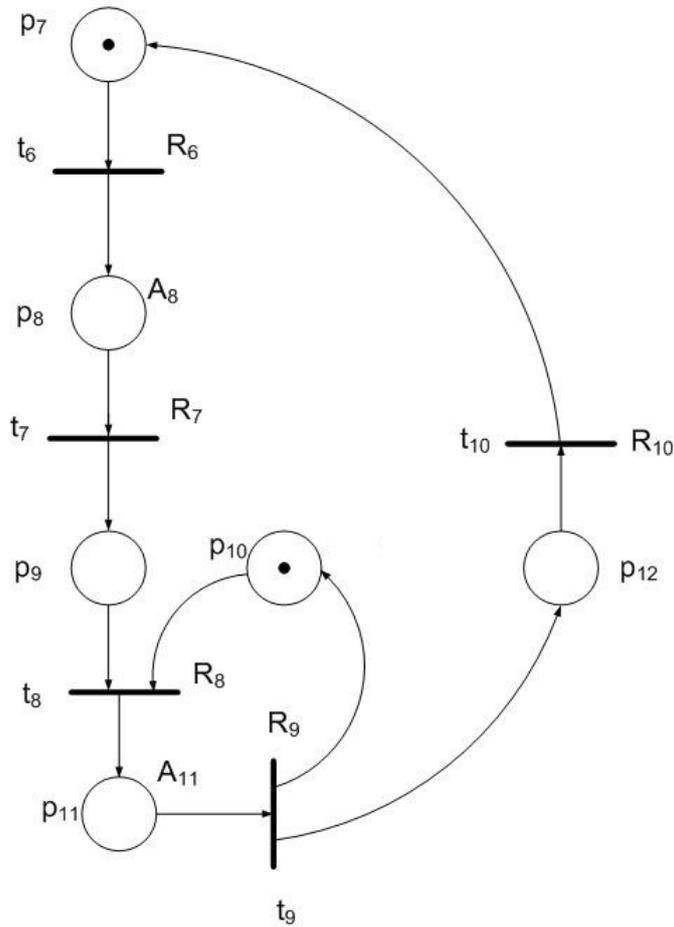


Figura 4.2: RPIC para injeção de óleo.

Tabela 4.3: Receptividades associadas às transições da RPIC para injeção de óleo.

Transições	Receptividade	Descrição
t_6	R_6	B_6
t_7	R_7	B_7
t_8	R_8	e
t_9	R_9	$B_9 + [290 > PT09] + [PT09 > 510]$
t_{10}	R_{10}	B_{10}

Tabela 4.4: Estados e ações associados aos lugares da RPIC para injeção de óleo.

Lugares	Estado	Ação
p_7	Válvula V_{02} fechada	Abrir válvula V_{02}
p_8		
p_9	Válvula V_{02} aberta	Ligar bomba P_{02}
p_{10}	Bomba P_{02} desligada	
p_{11}		
p_{12}	Válvula V_{02} fechando	

está sendo aberta. Com o tempo percorrido para que a válvula esteja completamente aberta, o sinal $B12$ associado à receptividade $R12$ muda de zero para 1 e o lugar p_{14} com uma ficha, habilita a transição t_{12} que dispara fazendo com que o lugar p_{14} perca sua ficha e o lugar p_{15} ganhe uma ficha. O lugar p_{15} representa a válvula $V03$ completamente aberta. O lugar p_{16} significa que o compressor de ar está desligado e pronto para ser ligado.

Com uma ficha no lugar p_{15} e outra no lugar p_{16} ainda não é o suficiente para o disparo da próxima transição. É necessário que exista pelo menos um fluido no sistema água ou óleo ou água e óleo portanto, para que o compressor ligue, deve haver uma condição de que pelo menos uma das duas bombas – $P01$, $P02$ – estejam funcionando, que na figura 4.3 estão representadas pelos lugares p_5 e p_{11} , respectivamente. De acordo com a figura 4.3 haverá um conflito caso os lugares p_5 e p_{11} estiverem cada um com uma ficha. Este conflito será solucionado utilizando um arco inibidor. Portanto, caso se tenha uma ficha em p_5 e nenhuma em p_{11} , a transição t_{13} está habilitada e conseqüentemente dispara enquanto a transição t_{14} não está habilitada. Caso se tenha uma ficha em p_{11} e nenhuma em p_5 , é a vez da transição t_{14} estar habilitada e conseqüentemente dispara enquanto a transição t_{13} está desabilitada. Uma outra possibilidade é se os lugares p_5 e p_{11} possuem uma ficha cada, existe o conflito que é solucionado com o arco inibidor, pois a transição t_{13} está habilitada enquanto a transição t_{14} está desabilitada devido à ação do arco inibidor sobre ela. As transições t_{13} e t_{14} possuem associadas à elas o evento que sempre ocorre, e . Com o disparo da transição t_{13} ou da transição t_{14} , os lugares p_{15} e p_{16} perdem suas respectivas fichas e o lugar p_{17} ganha uma ficha, este disparo está associado ao acionamento do compressor de ar $C01$. O lugar p_{17} é associado ao comando ligar compressor de ar $C01$. Nas transições t_{13} e t_{14} existe um arco em cada transição conectando aos lugares p_5 e p_{11} respectivamente, para assegurar que esses lugares tenham sempre uma ficha para manter as bombas $P01$ e/ou $P02$ ligadas.

Com a ficha em p_{17} , o compressor está ligado e injetando gás na linha a montante da bomba parafuso. O lugar p_{17} somente perderá sua ficha caso ocorra uma das três condições: a primeira é caso o operador interfira no sistema com um comando externo

associado à transição t_{15} . Com o acionamento do operador, a transição t_{15} recebe um sinal $B15$ associado à receptividade $R15$ e dispara essa transição. Com isso, o lugar p_{17} perde sua ficha e p_{16} e p_{18} ganham uma ficha cada, resultando no desligamento do compressor $C01$ e dando início ao processo de fechamento da válvula $V03$. A ficha no lugar p_{18} representa o regime transitório da válvula fechando. Com o sinal $B17$ associado à receptividade $R17$ igual a 1 e com uma ficha no lugar p_{18} , a transição t_{17} dispara, fazendo com que o lugar p_{18} perca sua ficha e o lugar p_{13} ganha uma ficha, o que resulta no retorno do estado inicial do sistema, com o compressor de ar $C01$ desligado e a válvula $V03$ fechada. A segunda condição para que o lugar p_{17} perca sua ficha é uma opção de segurança para preservar a integridade do compressor de ar $C01$. A transição t_{15} irá disparar quando ocorrer as condições de subpressão ou sobrepessão pré-configuradas. Estes dados de pressão serão coletados pelo transmissor de pressão $PT10$. A terceira e última condição para que o lugar p_{17} perca sua ficha é uma opção de segurança do sistema para preservar a integridade da bomba duplo parafuso visto que a mesma não pode funcionar somente com gás, havendo a necessidade de se ter, pelo menos um fluido no sistema. A transição t_{16} irá disparar quando ocorrer o desligamento simultâneo das bombas de água e de óleo, isto é, quando houver uma ficha nos lugares p_4 e p_{10} . O disparo de t_{16} resulta nas mesmas conexões do disparo de t_{15} , levando ao desligamento do compressor de ar $C01$ – associado ao lugar p_{16} – e o fechamento da válvula $V03$ – associado ao lugar p_{18} .

As transições t_{15} e t_{16} estão em conflito. Esse conflito pode ser resolvido com utilizando a ferramenta de prioridade. Caso t_{15} e t_{16} estejam habilitadas, a transição t_{16} tem prioridade sobre a transição t_{15} . A figura da rede de Petri interpretada para controle é mostrada na figura 4.3, seguida da tabela de receptividades associadas às transições da rede de Petri interpretada para controle e da tabela de estados e ações associados aos lugares da rede de Petri interpretada para controle, tabelas 4.5 e tabela 4.6, respectivamente.

Tabela 4.5: Receptividades associadas às transições da RPIC para injeção de gás.

Transições	Receptividade	Descrição
t_{11}	$R11$	$B11$
t_{12}	$R12$	$B12$
t_{13}	$R13$	$B4 + [290 > PT08] + [PT08 > 510]$
t_{14}	$R14$	$B9 + [290 > PT09] + [PT09 > 510]$
t_{15}	$R15$	$B15 + [290 > PT09] + [PT09 > 510]$
t_{16}	$R16$	e
t_{17}	$R17$	$B17$

Tabela 4.6: Estados e ações associados aos lugares da RPIC para injeção de gás.

Lugares	Estado	Ação
p_4	Bomba $P01$ desligada	
p_5		Ligar bomba $P01$
p_{10}	Bomba $P02$ desligada	
p_{11}		Ligar bomba $P02$
p_{13}	Válvula $V03$ fechada	
p_{14}		Abrir válvula $V03$
p_{15}	Válvula $V03$ aberta	
p_{16}	Compressor $C01$ desligado	
p_{17}		Ligar compressor $C01$
p_{18}	Válvula $V03$ fechando	

4.1.4 Procedimento de partida da bomba duplo parafuso

O procedimento para partida da bomba duplo parafuso é simples. O lugar p_{19} mostrado na figura 4.4 representa a bomba parafuso desligada. Para dar partida na bomba é preciso que se tenha pressão suficiente na linha à montante da bomba, visto que ela não pode trabalhar a vazio ou somente com gás. Com isso será considerado que a bomba parafuso somente irá dar partida caso tenha registrado um valor de pressão superior ao valor pré-definido no transmissor de pressão $PT01$. Essa condição está representada na transição t_{18} , isto é, a transição irá disparar quando tiver uma ficha em p_{19} e quando tiver alcançado o valor de pressão pré-estabelecido. Com o disparo da transição t_{18} , o lugar p_{19} perde sua ficha e o lugar p_{20} ganha uma ficha. O lugar p_{20} está associado ao comando ligar a bomba $TSP01$. Enquanto a ficha estiver no lugar p_{20} , o ciclo de teste estará funcionando.

Assim como há uma condição de pressão para a partida, existe também uma condição caso o transmissor de pressão $PT01$ tenha um sinal de amostragem menor do que o

valor pré-estabelecido. Se esse valor for atingido, a rede de Petri entende que as bombas centrífugas e/ou o compressor – $P01$, $P02$, $C01$ – não são sendo capazes de fornecer o fluido que a bomba parafuso necessita ou então que as mesmas foram desligadas. Então com a finalidade de preservar a bomba duplo parafuso e as bombas centrífugas ou simplesmente finalizar o teste, a transição t_{19} dispara, fazendo com que o lugar p_{20} perca sua ficha e o lugar p_{19} ganhe sua ficha, desligando a bomba parafuso e retornando à marcação inicial da rede de Petri. A figura da rede de Petri interpretada para controle é mostrada na figura 4.4, e as tabelas de receptividades associadas às transições da rede de Petri interpretada para controle e da tabela de estados e ações associados aos lugares da rede de Petri interpretada para controle, podem ser vistas nas tabelas 4.7 e tabela 4.8, respectivamente.

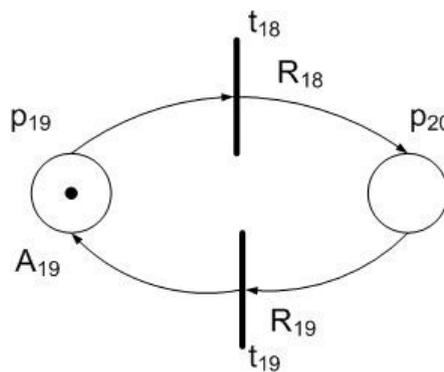


Figura 4.4: RPIC para partida da bomba duplo parafuso.

Tabela 4.7: Receptividades associadas às transições da RPIC para partida da bomba duplo parafuso.

Transições	Receptividade	Descrição
t_{18}	R_{18}	$[400 < PT01]$
t_{19}	R_{19}	$[400 > PT01] + [PT01 > 510]$

Tabela 4.8: Estados e ações associados aos lugares da RPIC para partida da bomba duplo parafuso.

Lugares	Estado	Ação
p_{19}	Bomba parafuso desligada	Ligar a bomba parafuso
p_{20}		

4.1.5 Rede de Petri interpretada para controle do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino

Nesta seção será mostrada a figura da rede de Petri interpretada para controle do ciclo de testes. O que foi feito foi somente unir as redes de Petri interpretadas para controle construídas nas seções anteriores e verificar se há algum conflito na rede de Petri completa.

Pode-se observar que existem dois conflitos: o primeiro é entre as transições t_4 e t_{13} e o segundo conflito é entre as transições t_9 e t_{14} . Esses conflitos só irão ocorrer quando, por exemplo, o operador acionar o botão para desligar a bomba $P01$ no mesmo momento em que o compressor $C01$ der partida. Este conflito é solucionado pela receptividade, na transição t_{14} a receptividade é definida como $\overline{(R_4)}$, ou seja, a negação da receptividade R_4 quando R_4 for 1 $\overline{(R_4)}$ será 0 e vice-versa. O mesmo método é utilizado para solucionar o conflito existente entre as transições t_9 e t_{14} .

A figura da rede de Petri interpretada para controle completa para o ciclo de testes do módulo de bombeio submarino é mostrada na figura 4.5, e as tabelas de receptividades associadas às transições da rede de Petri interpretada para controle e da tabela de estados e ações associados aos lugares da rede de Petri interpretada para controle, podem ser vistas nas tabelas 4.9 e tabela 4.10, respectivamente.

A tabela 4.11 explica o significado de cada sinal associado às receptividades da rede de Petri interpretada para controle do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino.

4.2 Conclusão

O controle automático do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino foi modelado através de uma rede de Petri interpretada para controle. A rede de Petri foi modelada com a intenção de descrever o comportamento do sistema incluindo ações de nível que o sistema deverá realizar com a sincronização a eventos externos.

Com a finalidade de descrever o comportamento do sistema, a rede de Petri interpretada para controle foi dividida em quatro subgrupos: o primeiro para a injeção de água no sistema, o segundo injeção de óleo no sistema, o terceiro injeção de gás e o quarto e último, a partida da bomba de duplo parafuso. Como resultado final, tem-se a união

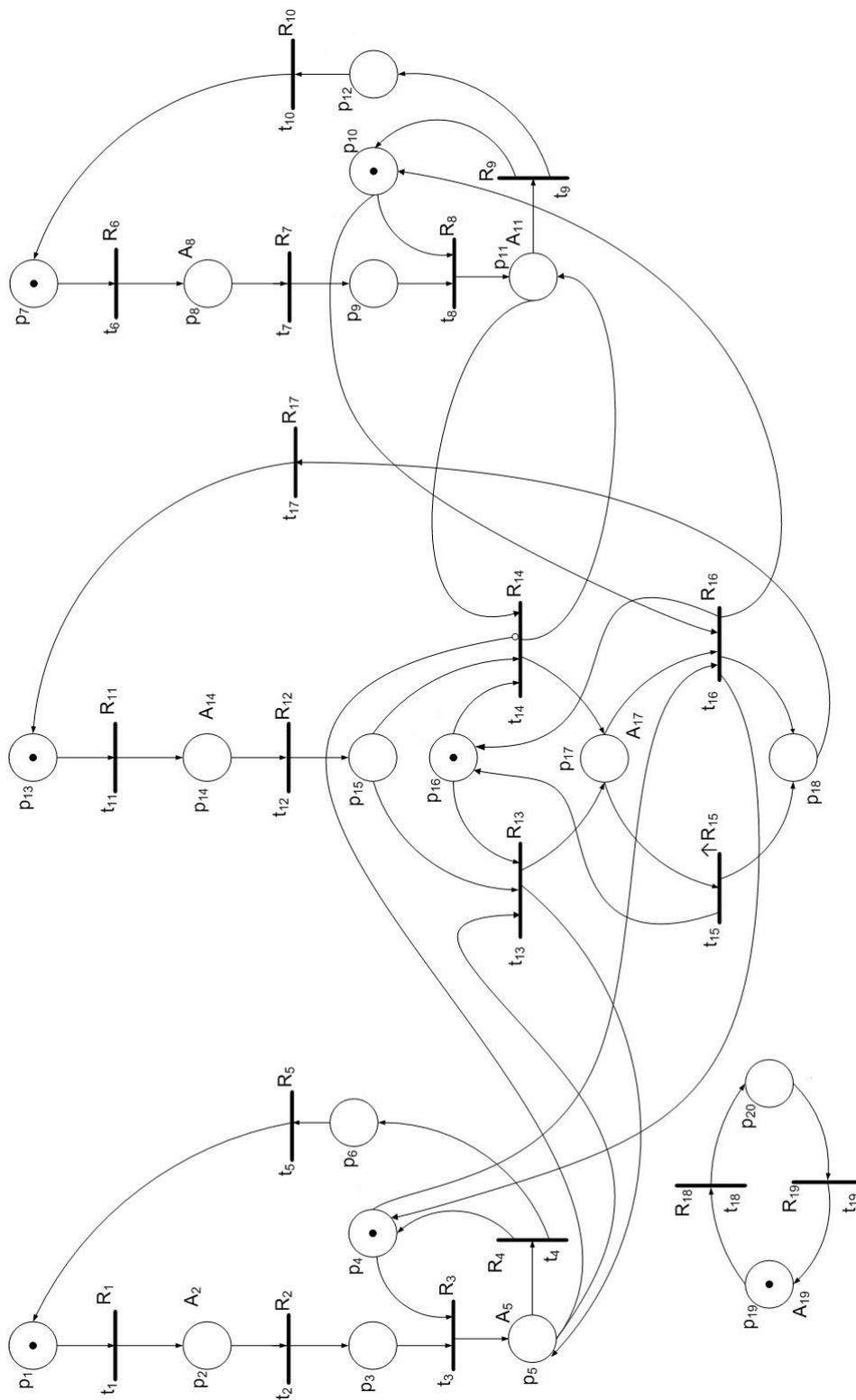


Figura 4.5: RPIC do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino.

Tabela 4.9: Receptividades associadas às transições da RPIC do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino.

Transições	Receptividade	Descrição
t_1	$R1$	$B1$
t_2	$R2$	$B2$
t_3	$R3$	e
t_4	$R4$	$B4 + [290 > PT08] + [PT08 > 510]$
t_5	$R5$	$B5$
t_6	$R6$	$B6$
t_7	$R7$	$B7$
t_8	$R8$	e
t_9	$R9$	$B9 + [290 > PT09] + [PT09 > 510]$
t_{10}	$R10$	$B10$
t_{11}	$R11$	$B11$
t_{12}	$R12$	$B12$
t_{13}	$R13$	$\overline{B4 + [290 > PT08] + [PT08 > 510]}$
t_{14}	$R14$	$\overline{B9 + [290 > PT09] + [PT09 > 510]}$
t_{15}	$R15$	$\overline{B15 + [290 > PT09] + [PT09 > 510]}$
t_{16}	$R16$	e
t_{17}	$R17$	$B17$
t_{18}	$R18$	$[400 < PT01]$
t_{19}	$R19$	$[400 > PT01] + [PT01 > 510]$

Tabela 4.10: Estados e ações associados aos lugares da RPIC do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino.

Lugares	Estado	Ação
p_1	Válvula $V01$ fechada	
p_2		Abrir válvula $V01$
p_3	Válvula $V01$ aberta	
p_4	Bomba $P01$ desligada	
p_5		Ligar bomba $P01$
p_6	Válvula $V01$ fechando	
p_7	Válvula $V02$ fechada	
p_8		Abrir válvula $V02$
p_9	Válvula $V02$ aberta	
p_{10}	Bomba $P02$ desligada	
p_{11}		Ligar bomba $P02$
p_{12}	Válvula $V02$ fechando	
p_{13}	Válvula $V03$ fechada	
p_{14}		Abrir válvula $V03$
p_{15}	Válvula $V03$ aberta	
p_{16}	Compressor $C01$ desligado	
p_{17}		Ligar compressor $C01$
p_{18}	Válvula $V03$ fechando	
p_{19}	Bomba parafuso desligada	
p_{20}		Ligar a bomba parafuso

Tabela 4.11: Sinais associados às receptividades.

Nome	Comentário
<i>B1</i>	Evento externo abrir válvula de água
<i>B2</i>	Evento válvula de água aberta
<i>B4</i>	Evento externo desligar bomba de água
<i>B5</i>	Evento válvula de água fechada
<i>B6</i>	Evento externo abrir válvula de óleo
<i>B7</i>	Evento válvula de óleo aberta
<i>B9</i>	Evento externo desligar bomba de óleo
<i>B10</i>	Evento válvula de óleo fechada
<i>B11</i>	Evento externo abrir válvula de gás
<i>B12</i>	Evento válvula de gás aberta
<i>B15</i>	Evento externo desligar compressor de gás
<i>B17</i>	Evento válvula de gás fechada

desses quatro subgrupos formando uma única rede de Petri interpretada para controle do sistema como um todo. No capítulo seguinte será realizada a conversão da rede de Petri interpretada para controle em uma linguagem de programação de CLP, diagrama Ladder.

Capítulo 5

Conversão da RPIC do módulo de bombeio em Ladder

Neste capítulo é apresentada a conversão da rede de Petri Interpretada para Controle em diagrama Ladder, dando continuidade ao processo de automação do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino. Na seção 5.1 é apresentada a linguagem Ladder que é uma das linguagens mais utilizadas para programação de CLPs. Na seção 5.2 é mostrado o método de conversão que é baseado nas matrizes de incidência de RPIC. Na seção 5.3 são mostradas as matrizes de incidência de entrada e saída das redes de Petri interpretadas para controle descritas no capítulo 4 e na seção 5.4 é mostrado o diagrama Ladder do sistema proposto.

5.1 Linguagem Ladder

Esta seção tem como finalidade apresentar os principais elementos utilizados no projeto.

5.1.1 Lógica de um diagrama Ladder

A estrutura de um diagrama Ladder é composto por linhas de comando chamadas de rungs e de diversos elementos que são descritos na seção 5.1.2. A execução do programa é realizada da esquerda para a direita e de cima para baixo. A figura 5.1 mostra um exemplo com duas linhas de comando e as setas indicam o sentido de execução do programa.

Pode-se dizer que a lógica dos diagramas Ladder funciona analogamente a um circuito elétrico. Por exemplo, quando se tem um contato aberto, não há passagem da

"corrente elétrica". Quando se tem um contato fechado, é como se houvesse uma passagem de corrente no sentido da esquerda para a direita.

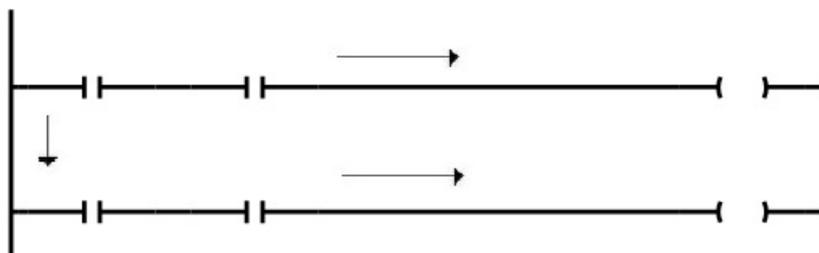


Figura 5.1: Exemplo de dois rungs.

5.1.2 Elementos de um diagrama Ladder

Nesta seção são apresentados os elementos mais comuns para a construção do diagrama Ladder. Tais elementos podem ser de entrada ou saída. Os elementos de entrada mais comuns são os contatos, enquanto que, bobinas e os comandos "set" e "reset" são os elementos de saída mais utilizados.

Contatos

Contatos são considerados como os elementos mais comuns em um diagrama Ladder, ao lado das bobinas. Um contato é um elemento de entrada que podem ter duas configurações, normalmente fechado (NF) ou normalmente aberto (NA). O contato normalmente fechado quando não está energizado possui associado a ele o valor lógico 1 e quando está energizado possui o valor zero. O contato normalmente aberto tem seu funcionamento ao contrário, quando é energizado possui o valor 1 e zero quando não energizado. Utilizando-se a analogia da corrente elétrica, somente haverá passagem de corrente quando o contato NF não estiver energizado e no contato NA quando estiver energizado. Um exemplo de contato normalmente fechado e normalmente aberto é mostrado na figura 5.2.

Bobinas

Bobinas, assim como os contatos, podem ser considerados como os elementos mais comuns na construção do diagrama Ladder. Bobinas são elementos que são energizados quando a corrente no rung tem valor lógico igual a 1. As bobinas continuarão energizadas até que



Figura 5.2: Contatos normalmente fechado e normalmente aberto.

o valor da corrente do rung passe de 1 para zero fazendo com que a bobina não receba mais a corrente. Um exemplo de bobina é mostrado na figura 5.3.



Figura 5.3: Bobina.

Set e Reset

Os comandos "set" e "reset" possuem a propriedade de alterar o valor de um bit. Por exemplo, quando um elemento set é energizado, o bit ao qual está associado passa a ter valor 1, enquanto o reset, quando energizado, altera o valor do bit para zero. Um bit que foi alterado para o valor zero por um reset, somente irá retornar ao valor 1 quando um set associado a esse mesmo bit for energizado. A representação de set e reset é mostrado na figura 5.4.

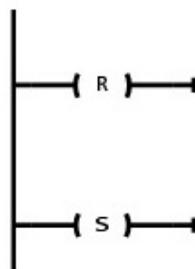


Figura 5.4: Representação de set e reset.

OSR (One Shot Rising)

O elemento OSR one-shot rising (detector de borda de subida) é um dispositivo de entrada e seu funcionamento é dado pela seguinte lógica: quando o valor lógico da parte do rung antes do OSR é alterado de zero para 1, o OSR passa a ser 1 também. Esse fechamento do OSR dura um ciclo de varredura e, após o ciclo ele volta ao valor lógico zero. O OSR somente voltará a ter valor lógico 1 quando ocorrer a mudança de zero para 1 no rung.

Um detalhe a ser observado é que não é suficiente que a parte do rung antes do OSR esteja completamente fechado para que ele se feche também. É necessário que exista uma alteração de zero para 1, em outras palavras deve haver uma mudança de also para verdadeiro na lógica deste rung. Se o diagrama Ladder iniciar com o caminho até o OSR com o valor lógico 1, o OSR não fecha, pois não detectou a mudança do valor lógico de zero para 1.

O elemento OSR é a nomenclatura mais conhecida. No programa SIMATIC WinCC da Siemens o elemento OSR é dado por um contato com a letra 'P' como é mostrado na figura 5.5.



Figura 5.5: Representação do bloco OSR.

Compare

O elemento "compare" é um dispositivo de entrada e é aplicado antes de uma bobina quando é desejado comparar dois valores de variáveis. O elemento compare pode ser dos seguintes tipos: comparador maior que ($>$), comparador menor que ($<$), comparadores maior ou igual ($>=$) ou menor e igual ($<=$), comparadores de igualdade ($==$) ou de desigualdade ($<>$). Somente serão utilizados neste trabalho, na conversão da rede de Petri para o diagrama Ladder, os elementos maior que ($>$) e menor que ($<$).

Na figura 5.6 é ilustrado um exemplo com o elemento compare, onde é desejado que ocorra a energização da bobina $T19$ quando o valor de um transmissor de pressão $PT01$

atingir um valor maior do que 510PSI. Se o valor do transmissor for menor ou igual do que a constante determinada, o bit associado à ele será zero, caso contrário o bit passa a ter valor 1.

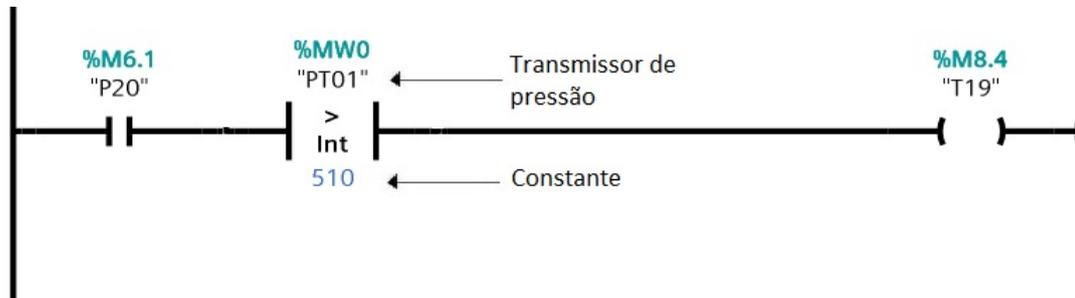


Figura 5.6: Elemento compare.

5.2 Conversão da RPIC em diagrama Ladder

Este método de conversão é dividido em cinco partes que correspondem a diferentes funções do programa: (i) módulo de iniciação de uma rede de Petri, que define a marcação inicial do sistema; (ii) módulo de eventos, associado às ocorrências de eventos; (iii) módulo de condições para disparo das transições, relacionado às receptividades das transições e com a matriz de incidência de entrada; (iv) módulo da dinâmica da rede de Petri. Essa parte mostra a evolução das fichas na rede de Petri utilizando a matriz de incidência; (v) módulo das ações, que define quais ações serão realizadas. [4]

Como exemplo será utilizada a rede de Petri interpretada para controle para injeção de água no sistema.

5.2.1 Módulo de iniciação de uma rede de Petri

O módulo de iniciação define o estado inicial da rede de Petri e é formado por um único rung. Esse rung do diagrama é constituído por um contato normalmente fechado associando as bobinas energizadas aos lugares inicialmente marcados. Após o primeiro ciclo de varredura o contato é aberto, não permitindo que este rung seja novamente executado. Na figuras 5.7 é possível ver o módulo de inicialização da rede de Petri interpretada para controle de injeção de água.

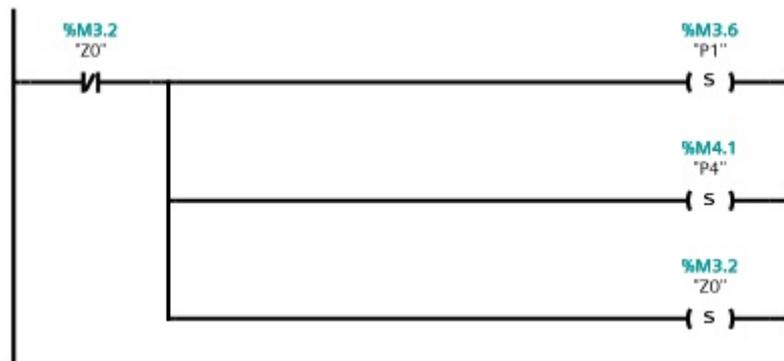


Figura 5.7: Módulo de iniciação de uma rede de Petri.

5.2.2 Módulo de eventos

O módulo de eventos consiste em perceber os eventos externos, de forma a gerar reações correspondentes por parte do controlador. Neste módulo, os eventos externos estão associados aos contatos normalmente abertos, enquanto os eventos internamente são representados pelas bobinas. Na figura 5.8 é mostrado o módulo de eventos correspondente.

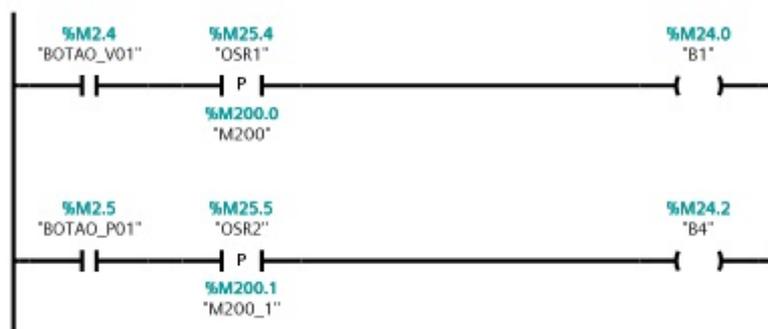


Figura 5.8: Módulo de eventos.

5.2.3 Módulo de condições para disparo das transições

O módulo de condições para disparo das transições possui basicamente a idéia de descrever a regra para o disparo da transição t_j , isto é, a transição t_j estará pronta para ser disparada quando o número de fichas nos lugares de entrada for maior ou igual ao peso do arco que os conectam à transição t_j e a condição C_j associada à receptividade R_j for verdadeira. A transição t_j dispara quando o evento e_j associado à R_j ocorre.

CAPÍTULO 5. CONVERSÃO DA RPIC DO MÓDULO DE BOMBEIO EM LADDER56

As condições associadas aos lugares de entrada podem ser obtidas pela matriz de incidência de entrada apresentada na seção 5.3. As condições de disparo são representadas por contatos normalmente abertos no diagrama Ladder da figura 5.8. Para representar o disparo de uma transição t_j uma associação em série de contatos normalmente abertos e fechados serão conectados para representar a receptividade R_j . Quando o valor desejado for alcançado, a transição estará pronta para ser disparada. Neste módulo é utilizado o elemento "compare", com a finalidade de fazer a comparação dos valores medidos nos transmissores de pressão e realizar a mudança do valor do bit de zero para 1.

Na figura 5.9 é possível ver os módulos de condições para disparo das transições das redes de Petri interpretadas para controle de injeção de água.

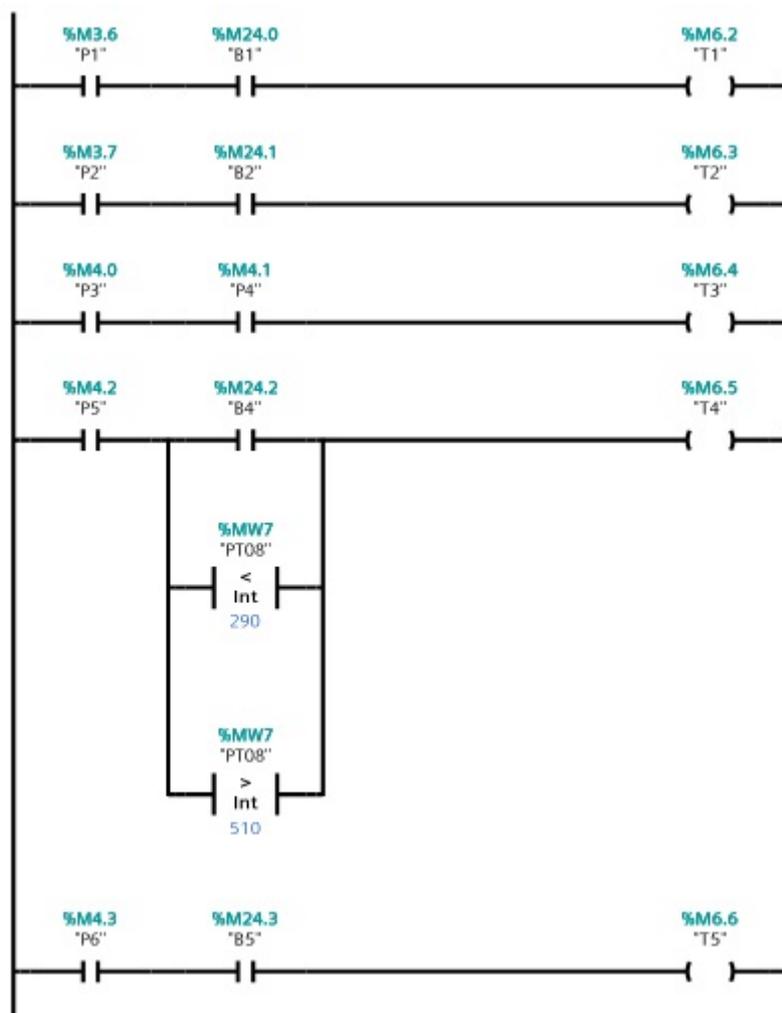


Figura 5.9: Módulo de condições de disparo das transições.

5.2.4 Módulo da dinâmica das redes de Petri

Após o disparo de uma transição t_j , o número de fichas deve ser atualizado. Para isso, tem-se o módulo da dinâmica da rede de Petri que é construído a partir da matriz de incidência W , desenvolvida na seção 5.3.

O módulo possui rungs, onde cada rung é associado a uma transição. Pode-se observar na figura 5.10 que no fim de cada rung existem comandos SET (S) e RESET (R). A finalidade desses comandos é remover a ficha do lugar de entrada (R) e adicionar uma ficha no lugar de saída (S).

5.2.5 Módulo das ações

Este módulo faz a associação das bobinas de saída com os lugares. As ações estão descritas nas tabelas 4.2, 4.4, 4.6 e 4.8. A ação P01-ON utilizada no sistema, é uma ação de nível, isto é, significa que enquanto a ficha estiver no local a bomba está ligada, caso o lugar perca a ficha, a bomba automaticamente irá desligar. Na figura 5.11 é mostrado o módulo da dinâmica da rede de Petri de injeção de água no sistema.

5.3 Matrizes de incidência

Para a planta proposta, foram criadas no capítulo 4 redes de Petri interpretadas para controle para descrever o funcionamento e controle do ciclo de testes do módulo de bombeio submarino. A partir dessas redes de Petri mostradas nas figuras 4.1, 4.2, 4.3, e 4.4 foram possíveis escrever as matrizes de incidência de entrada e saída, W_{in} e W_{out} , e a matriz de incidência W , que são mostradas abaixo.

5.3.1 Matrizes de incidência para injeção de água no sistema

Nesta subseção são mostradas as matrizes de incidência de entrada e saída e a matriz de incidência da rede de Petri da figura 4.1. As colunas são associadas às transições, t_1 a t_5 e as linhas são associadas aos lugares, p_1 a p_6 .

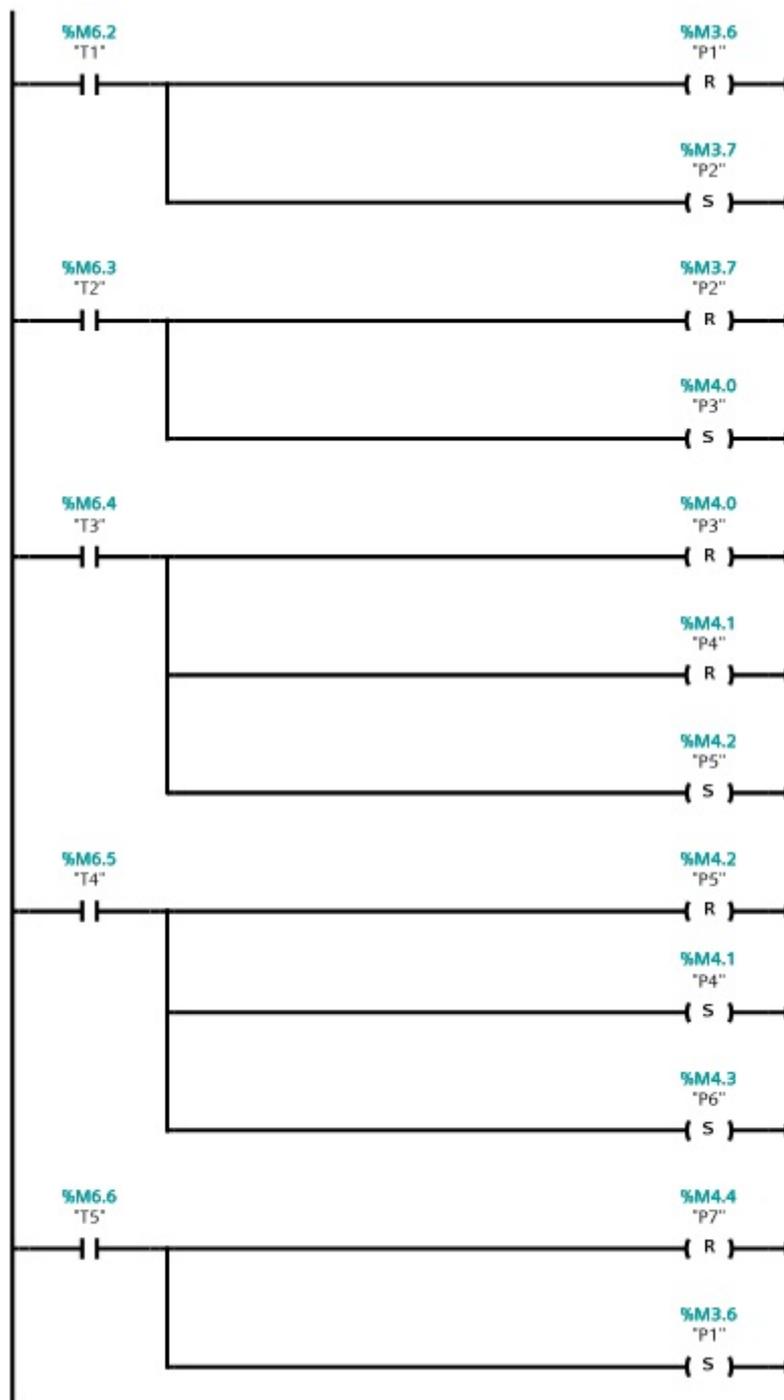


Figura 5.10: Módulo da dinâmica das redes de Petri.

$$W_{in} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

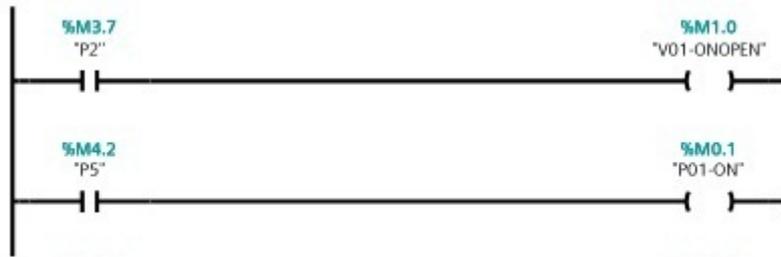


Figura 5.11: Módulo das ações.

$$W_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

5.3.2 Matrizes de incidência para injeção de óleo no sistema

Como visto na seção 4.1.2, a rede de Petri para injeção de água no sistema é igual à da rede de Petri para injeção de óleo, com as diferenças apenas nos tags. Portanto, as matrizes de incidência da rede de Petri para injeção de óleo também são iguais as de injeção de água.

5.3.3 Matrizes de incidência para injeção de gás no sistema

Nesta subseção são mostradas as matrizes de incidência de entrada e saída e a matriz de incidência da rede de Petri da figura 4.3. As colunas são associadas às transições, t_{11} a t_{17} e as linhas são associadas aos lugares, p_4, p_5, p_{10}, p_{11} e p_{13} a p_{18} . Os arcos inibidores são representados na matriz de incidência por $\bar{1}$, e sua função é dar condição para habilitar as transições, não removendo fichas dos lugares que conectam. Pode-se verificar um arco inibidor no elemento $w_{2,4}$ da matriz de incidência.

$$W_{in} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \bar{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \bar{1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

5.3.4 Matrizes de incidência para partida da bomba de duplo parafuso

Nesta subseção são mostradas as matrizes de incidência de entrada e saída e a matriz de incidência da rede de Petri da figura 4.4. As colunas são associadas às transições, t_{18} e t_{19} e as linhas são associadas aos lugares, p_{19} e p_{20} .

$$W_{in} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

5.4 Diagrama Ladder do sistema completo

O método de conversão de redes de Petri interpretadas para controle em diagrama Ladder é aplicado para o módulo de bombeio submarino utilizando a rede de Petri do sistema completa da figura 4.5. O diagrama Ladder do sistema completo está no Apêndice A.

O diagrama Ladder foi feito utilizando o programa SIMATIC WinCC da Siemens. Cada elemento possui associado a ele um tag e um endereço de bit que foi utilizado na hora de configurar o CLP. Esses valores aparecem no diagrama Ladder na parte superior de cada elemento. A lista completa dos tags e endereçamento de bits é mostrado no Apêndice B.

5.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a linguagem Ladder. Foram mostrados seus principais elementos e a função de cada um. Na seção 5.3 as matrizes de incidência das redes de Petri interpretadas para controle do capítulo 4 foram montadas e, em seguida, um método de conversão de redes de Petri interpretadas para controle para diagrama Ladder foi apresentado.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho teve como objetivo apresentar o projeto do controle automático de um ciclo de teste de um módulo de bombeio submarino utilizando redes de Petri interpretadas para controle.

Primeiramente foram estudados os principais conceitos e variações das redes de Petri. Os elementos, definições, lógica e dinâmica foram explicados e alguns exemplos foram mostrados para auxiliar o aprendizado. Foram apresentadas e definidas também as redes de Petri interpretadas para controle.

Uma breve introdução sobre os diferentes tipos de bombeio submarino foi apresentada. Em seguida, o ciclo de teste do módulo de bombeio submarino e seus principais componentes foram descritos e o princípio de funcionamento foi explicado detalhando o processo de injeção de cada fluido no sistema, bem como a partida e parada da bomba de duplo parafuso.

Com os conhecimentos sobre as redes de Petri interpretadas para controle e do princípio de funcionamento do ciclo de teste, foi criado um modelo de rede de Petri interpretada para controle baseada no modelo proposto por Moreira, Botelho, Basílio [4]. Para construir as redes de Petri do sistema, as possibilidades de injeção de fluido foram separados em três redes de Petri, a primeira para injeção de água no sistema, a segunda para injeção de óleo e a terceira para injeção de gás no sistema. Foi criada também uma rede de Petri para o acionamento da bomba de duplo parafuso. Em seguida, as quatro redes de Petri foram unificadas, criando assim a rede de Petri interpretada para controle do ciclo de teste do módulo de bombeio submarino.

Foram introduzidos os conceitos relacionados ao Diagrama Ladder. Seus principais elementos foram apresentados junto ao princípio de funcionamento. Com as redes de Petri interpretadas para controle e com conhecimento do diagrama Ladder, foi dado início ao processo de conversão baseado no método de Moreira, Botelho, Basílio [4]. Junto desse método foi realizado um exemplo com a rede de Petri para injeção de água no sistema com a finalidade de auxiliar a compreensão. Em seguida foram apresentadas as matrizes de incidência das redes de Petri baseadas nas definições de estado das redes de Petri visto no capítulo 2.

Finalmente foi realizada a conversão da rede de Petri interpretada para controle completa com base no método de conversão. Os resultados dessa conversão encontram-se no Apêndice A com o diagrama Ladder do módulo de bombeio submarino e no Apêndice B está a lista dos tags e do endereçamento dos bits da planta.

Com isto, pode-se concluir que as redes de Petri são de fácil compreensão e aplicação possuindo grande capacidade de modelagem mostrando-se bastante útil na elaboração de projetos de controle.

6.1 Sugestões futuras

Podem ser sugeridos para trabalhos futuros com a finalidade de completar este trabalho realizado: modelar outros algoritmos, aperfeiçoando a rede de Petri interpretada para controle de modo que não haja mais a necessidade de um operador atuando diretamente no ciclo de teste do módulo de bombeio. Inserir outros dispositivos de medição para aumentar a confiabilidade e a aquisição de dados do sistema. Acrescentar módulos e dispositivos de segurança como o desligamento de emergência total do ciclo de teste. Desenvolver um sistema de supervisão do tipo SCADA permitindo que o operador visualize e atue remotamente no ciclo de testes.

Dessa maneira estima-se que este trabalho estimule o aperfeiçoamento e desenvolvimento de outras metodologias com a utilização de redes de Petri interpretadas para controle em projetos de controle e automação de sistemas.

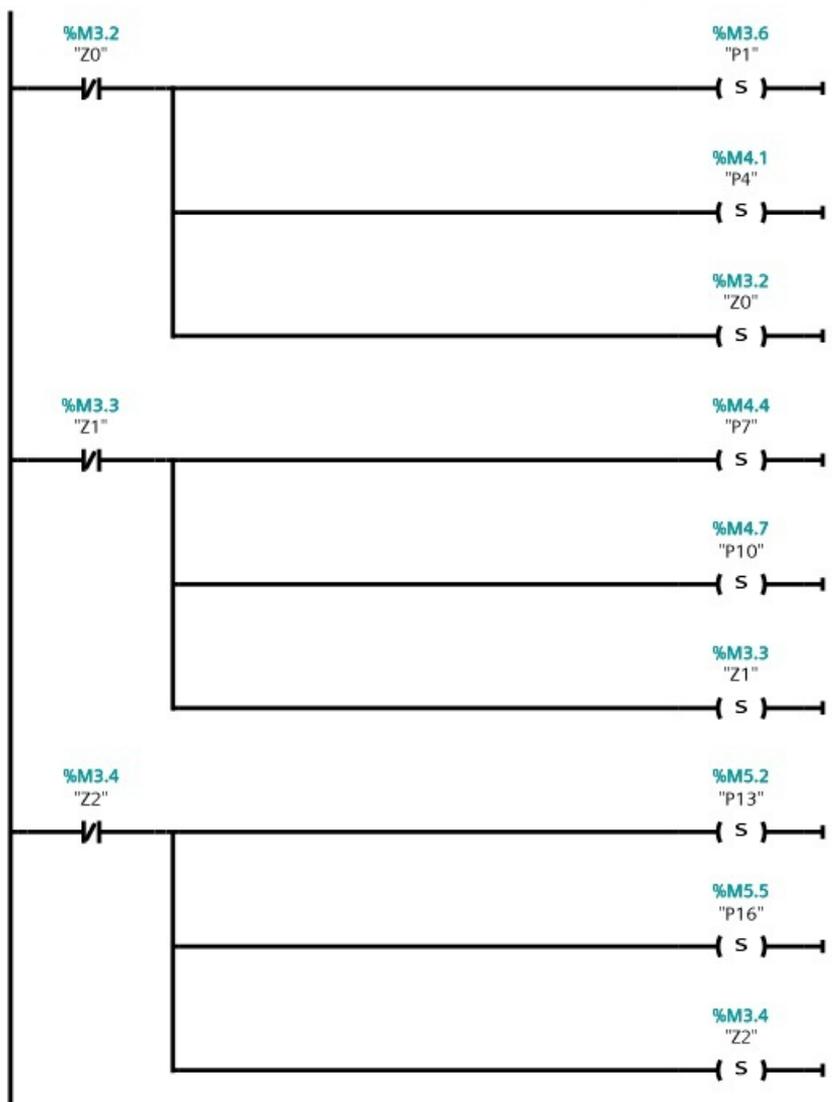
Bibliografia

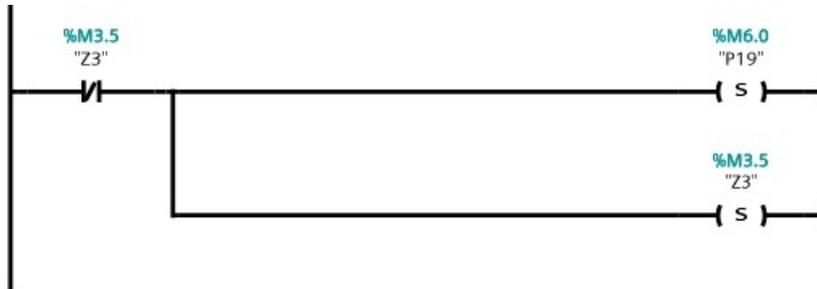
- [1] Cardoso, E.W, *Sistemas de Bombeamento Submarino Aspectos de Controle Estudo de Caso no Sistema de Elevação Artificial no Campo de BC-10* , Monografia de pós-graduação latu sensu da Coppe UFRJ MSO, 2007.
- [2] Cassandras, C. G. e Lafortune, S. *Introduction to Discrete Event System*, 2ª edição, Springer, 2008.
- [3] Davi, R. e Alla, H., *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets. Capítulo 3* . Springer, 2005.
- [4] Moreira, M. V.; Botelho, D. S e Basílio, J. C. *Ladder diagram implementation of Control Interpreted Petri Nets: a state equation approach 4th IFAC Workshop on Discrete-Event System Design, Valencia, Espanha, pp. 85 - 90* , 2009.

Apêndice A

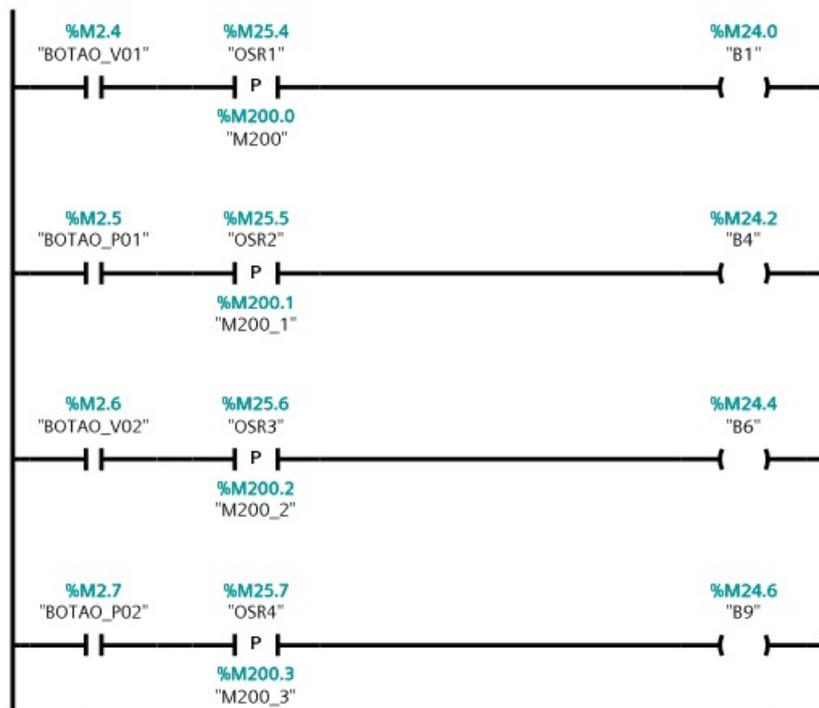
Diagrama Ladder

Network 1: Módulo de inicialização

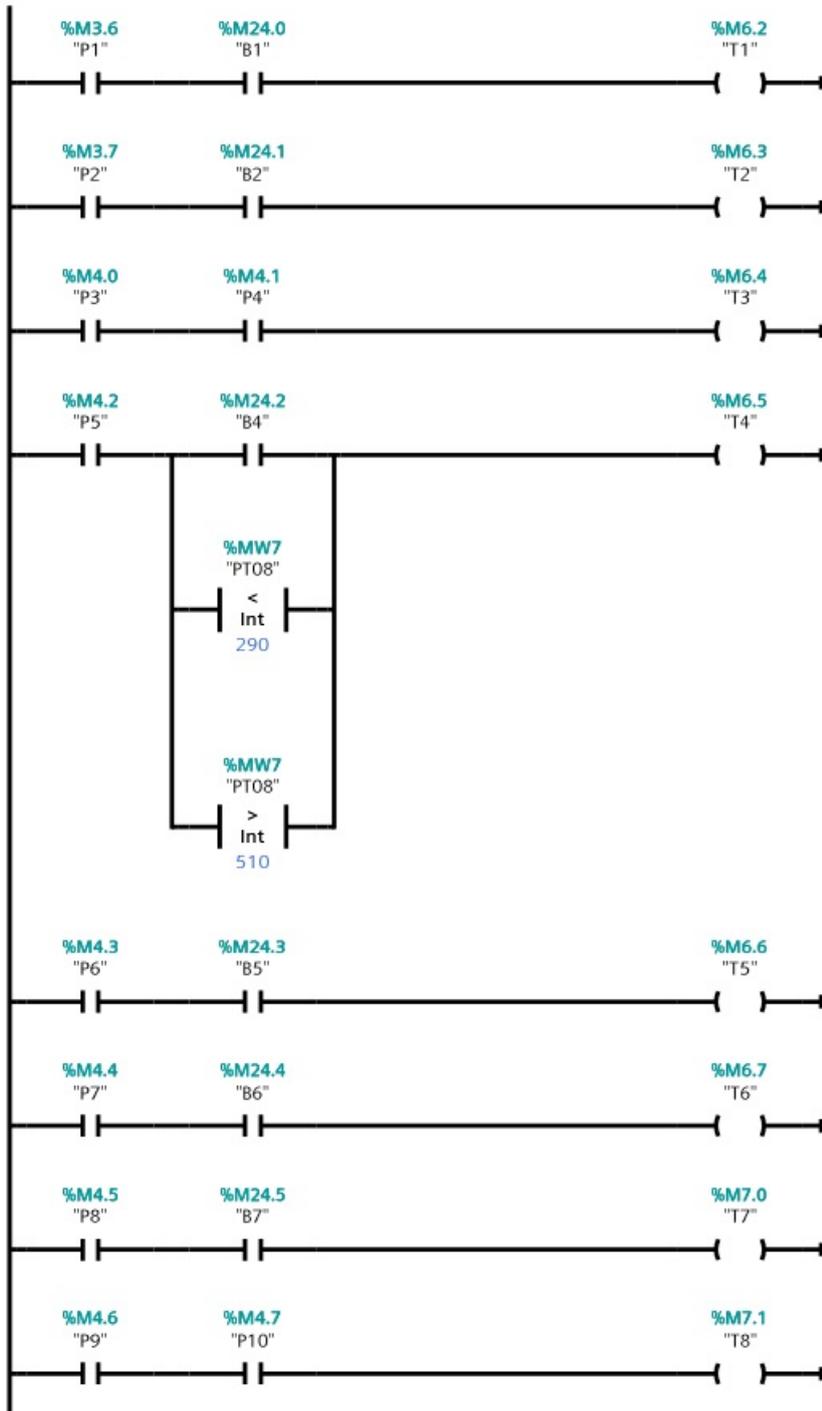


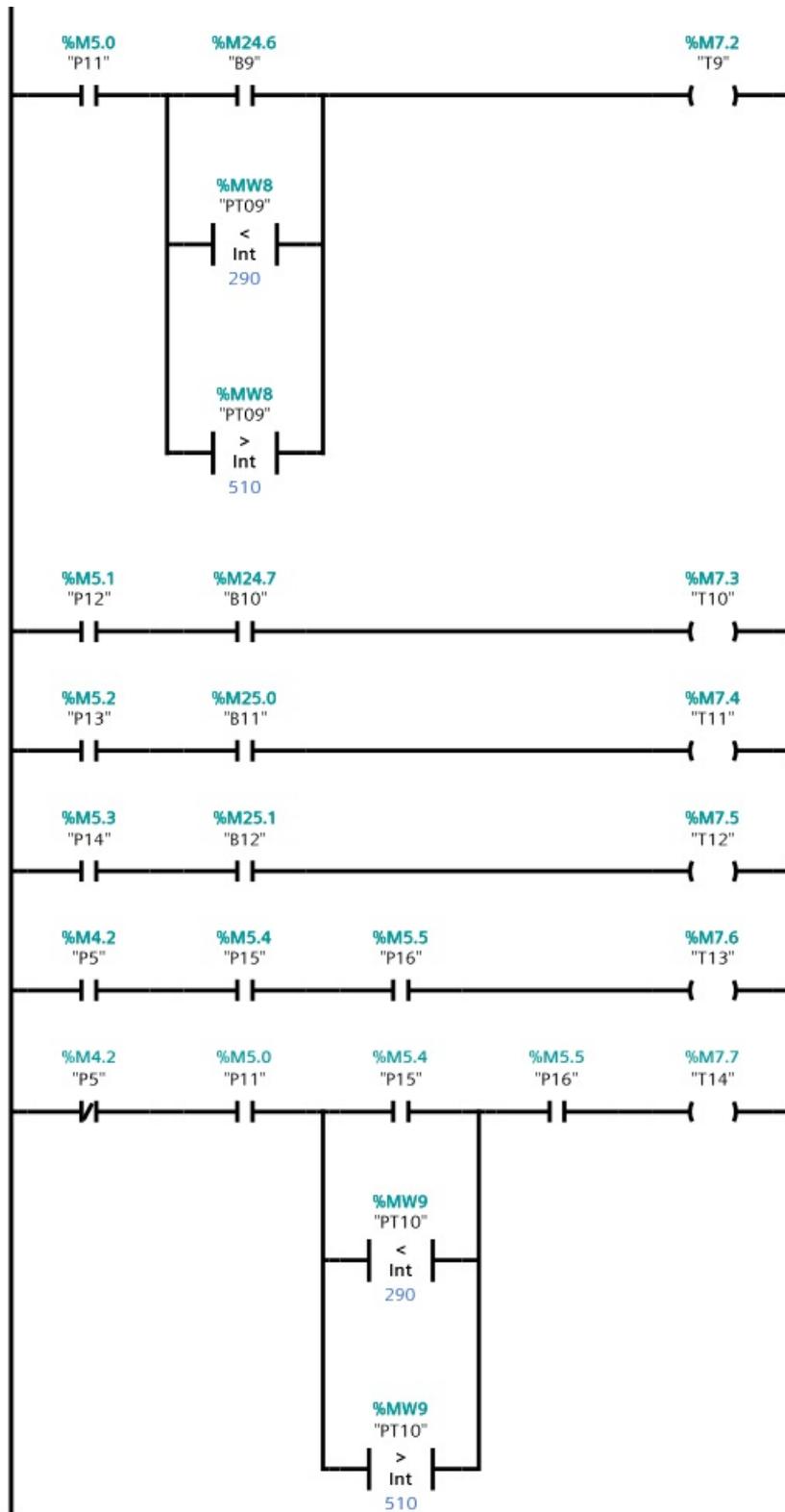


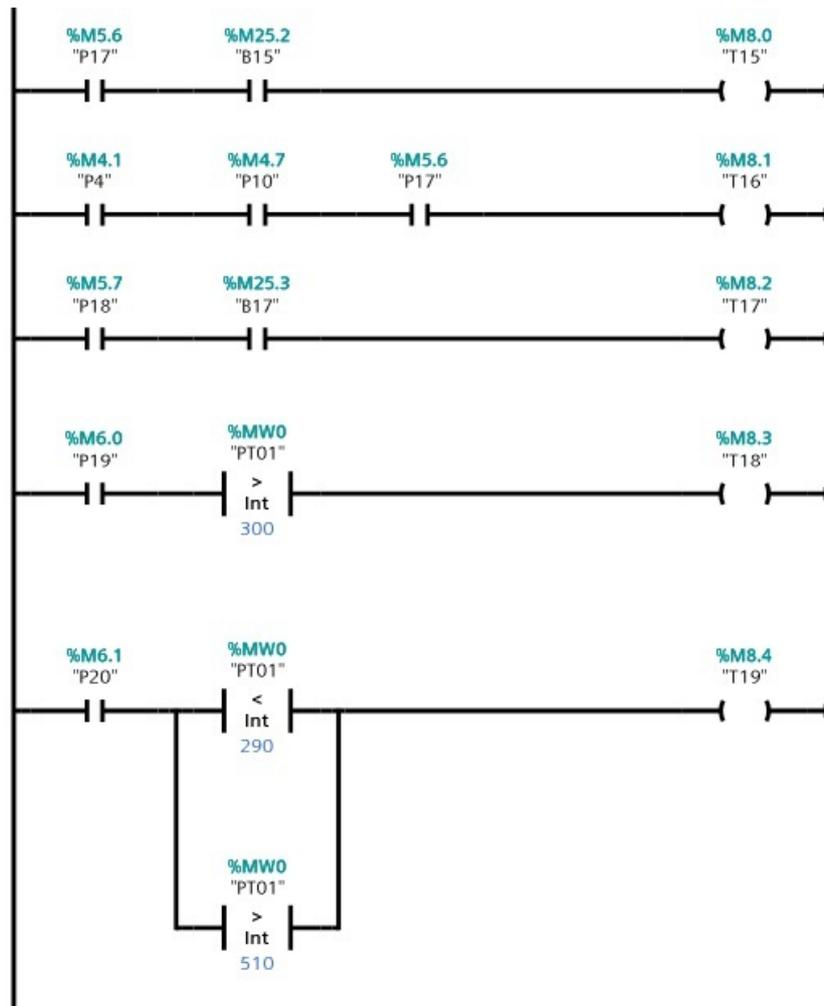
Network 2: Módulo de eventos



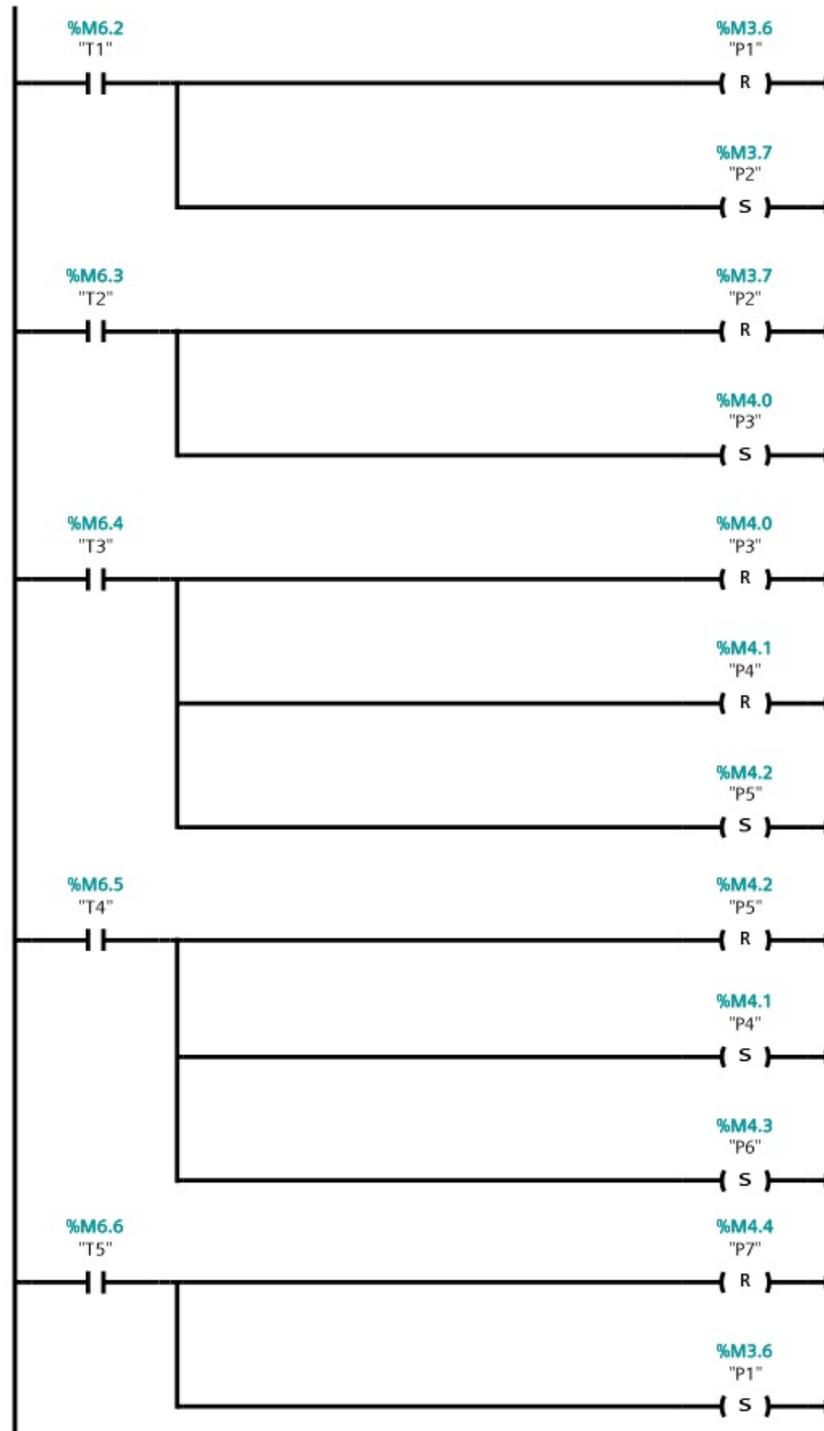
Network 3: Módulo de condições de disparo

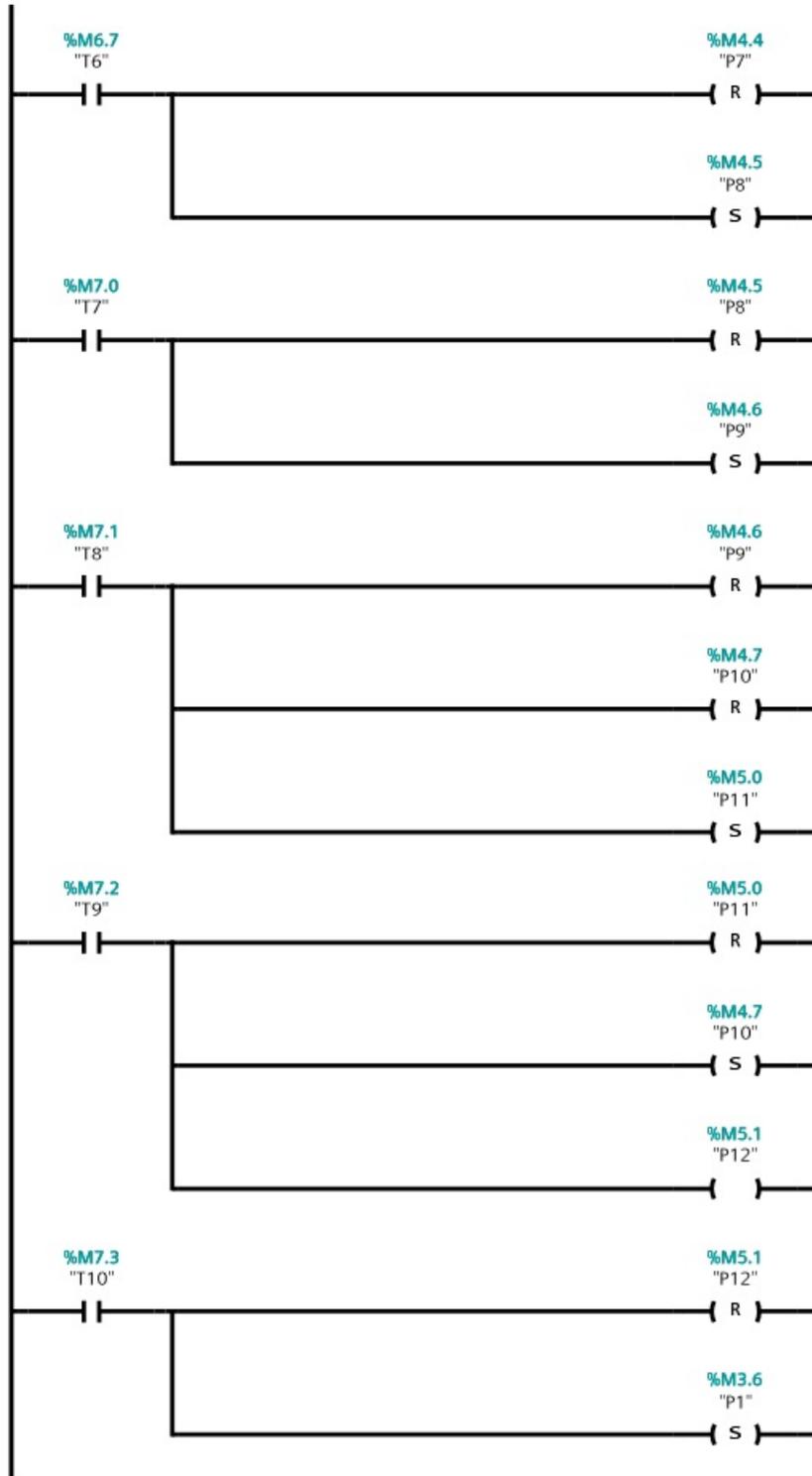


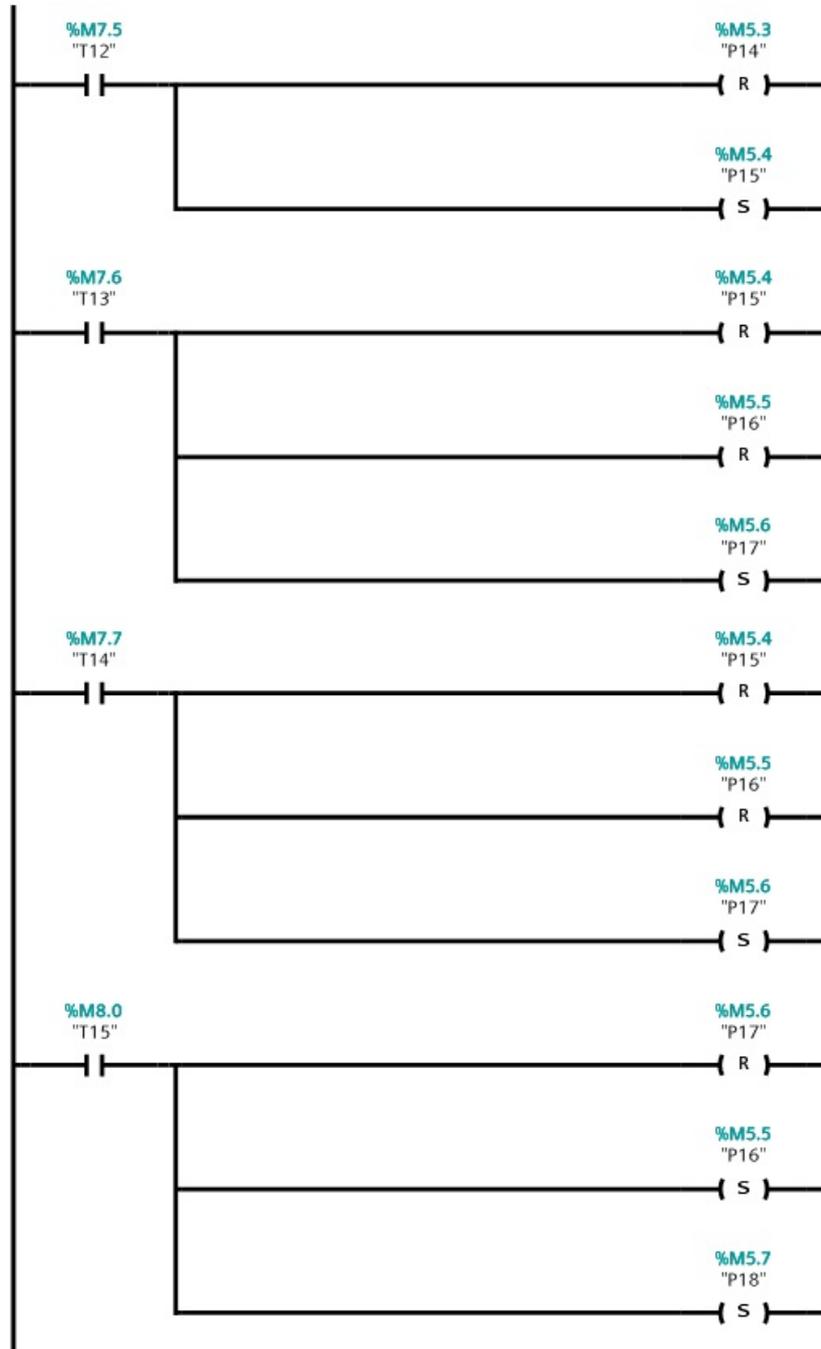


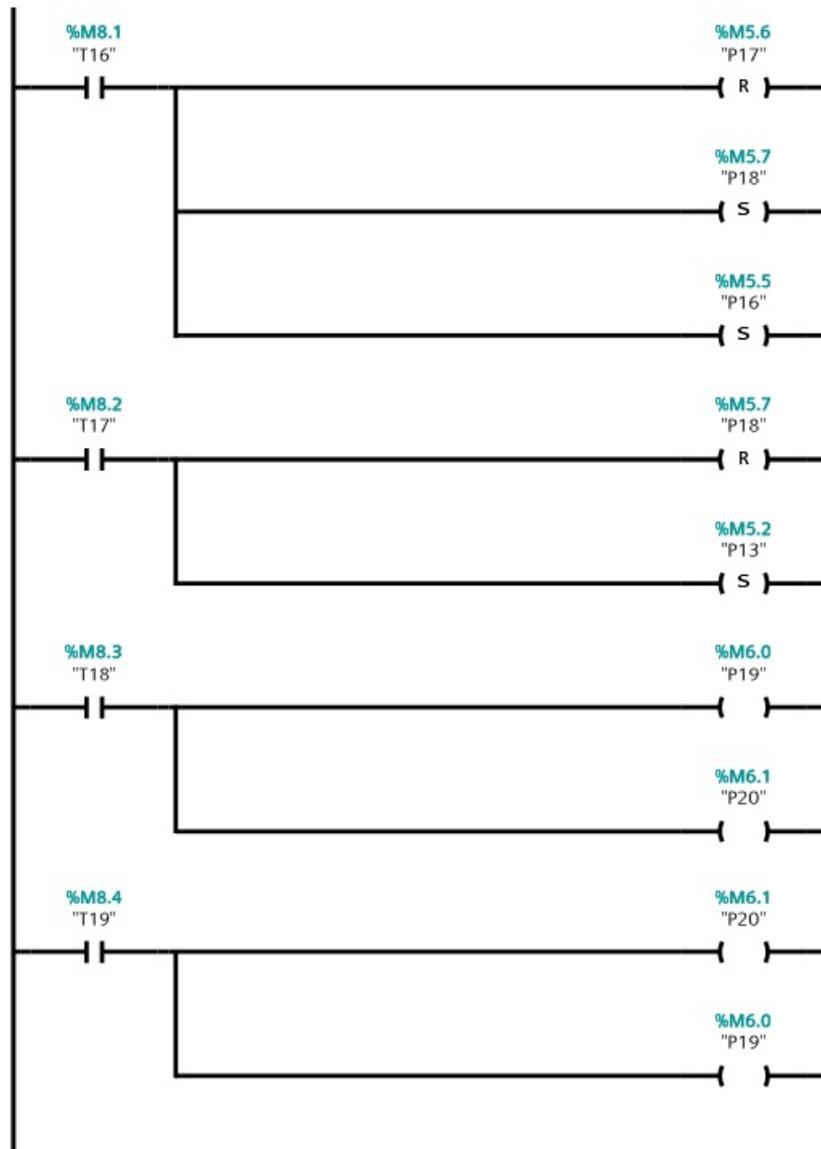


Network 4: Módulo de dinâmica



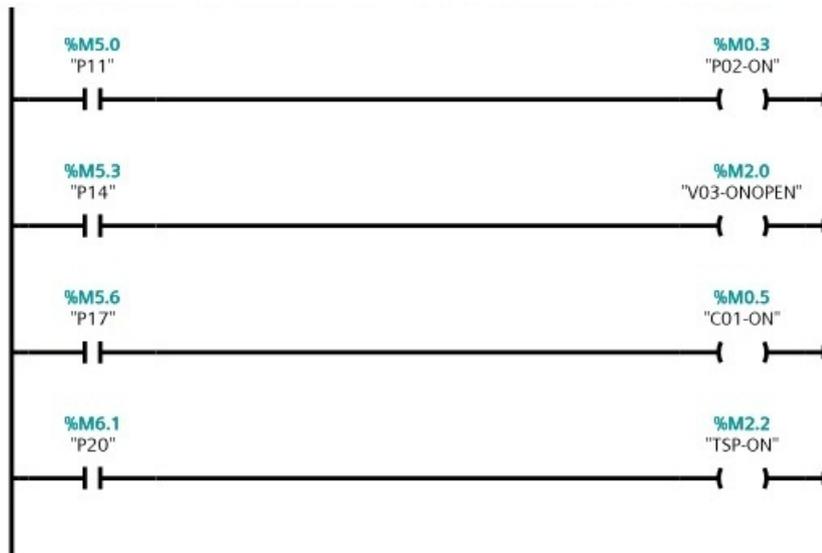






Network 5: Módulo das ações





Apêndice B

Lista de Tags

PLC tags

	Name	Data type	Address	Retain	Comment
	P01-OFF	Bool	%M0.0	<input type="checkbox"/>	Ação bomba água desligada
	P01-ON	Bool	%M0.1	<input type="checkbox"/>	Ação bomba água ligada
	P02-OFF	Bool	%M0.2	<input type="checkbox"/>	Ação bomba óleo desligada
	P02-ON	Bool	%M0.3	<input type="checkbox"/>	Ação bomba óleo ligada
	C01-OFF	Bool	%M0.4	<input type="checkbox"/>	Ação compressor desligado
	C01-ON	Bool	%M0.5	<input type="checkbox"/>	Ação compressor ligado
	V01-OPEN	Bool	%M0.6	<input type="checkbox"/>	Estado válvula água aberta
	V01-CLOSED	Bool	%M0.7	<input type="checkbox"/>	Estado válvula água fechada
	V01-ONOPEN	Bool	%M1.0	<input type="checkbox"/>	Ação abrir válvula água
	V01-ONCLOSE	Bool	%M1.1	<input type="checkbox"/>	Estado válvula água fechando
	V02-OPEN	Bool	%M1.2	<input type="checkbox"/>	Estado válvula óleo aberta
	V02-CLOSE	Bool	%M1.3	<input type="checkbox"/>	Estado válvula óleo fechada
	V02-ONOPEN	Bool	%M1.4	<input type="checkbox"/>	Ação abrir válvula óleo
	V02-ONCLOSE	Bool	%M1.5	<input type="checkbox"/>	Estado válvula óleo fechando
	V03-OPEN	Bool	%M1.6	<input type="checkbox"/>	Estado válvula gás aberta
	V03-CLOSE	Bool	%M1.7	<input type="checkbox"/>	Estado válvula gás fechada
	V03-ONOPEN	Bool	%M2.0	<input type="checkbox"/>	Ação abrir válvula gás
	V03-ONCLOSE	Bool	%M2.1	<input type="checkbox"/>	Estado válvula gás fechando
	TSP-ON	Bool	%M2.2	<input type="checkbox"/>	Ação ligar Twin Screw Pump
	TSP-OFF	Bool	%M2.3	<input type="checkbox"/>	Ação desligar Twin Screw Pump
	PT01	Int	%MW0	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 01
	PT02	Int	%MW1	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 02
	PT03	Int	%MW2	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 03
	PT04	Int	%MW3	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 04

	PT05	Int	%MW4	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 05
	PT06	Int	%MW5	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 06
	PT07	Int	%MW6	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 07
	PT08	Int	%MW7	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 08
	PT09	Int	%MW8	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 09
	PT10	Int	%MW9	<input type="checkbox"/>	Sensor de pressão 10
	TT01	Int	%MW10	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 01
	TT02	Int	%MW11	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 02
	TT03	Int	%MW12	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 03
	TT04	Int	%MW13	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 04
	TT05	Int	%MW14	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 05
	TT06	Int	%MW15	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 06
	TT07	Int	%MW16	<input type="checkbox"/>	Sensor de temperatura 07
	LT01	Int	%MW17	<input type="checkbox"/>	Sensor de nível 01
	LT02	Int	%MW18	<input type="checkbox"/>	Sensor de nível 02
	LT03	Int	%MW19	<input type="checkbox"/>	Sensor de nível 03
	FM01	Int	%MW20	<input type="checkbox"/>	Sensor de fluxo 01
	FM02	Int	%MW21	<input type="checkbox"/>	Sensor de fluxo 02
	FM03	Int	%MW22	<input type="checkbox"/>	Sensor de fluxo 03
	BOTAO_V01	Bool	%M2.4	<input type="checkbox"/>	Botão operador abrir V01
	BOTAO_P01	Bool	%M2.5	<input type="checkbox"/>	Botão operador parar P01
	BOTAO_V02	Bool	%M2.6	<input type="checkbox"/>	Botão operador abrir V02
	BOTAO_P02	Bool	%M2.7	<input type="checkbox"/>	Botão operador parar P02
	BOTAO_V03	Bool	%M3.0	<input type="checkbox"/>	Botão operador V03
	BOTAO_C01	Bool	%M3.1	<input type="checkbox"/>	Botão operador parar C01
	Z0	Bool	%M3.2	<input type="checkbox"/>	Marcação inicial RP água
	Z1	Bool	%M3.3	<input type="checkbox"/>	Marcação inicial RP óleo
	Z2	Bool	%M3.4	<input type="checkbox"/>	Marcação inicial RP gás
	Z3	Bool	%M3.5	<input type="checkbox"/>	Marcação inicial RP bomba parafuso
	P1	Bool	%M3.6	<input type="checkbox"/>	Lugar

	P2	Bool	%M3.7	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P3	Bool	%M4.0	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P4	Bool	%M4.1	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P5	Bool	%M4.2	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P6	Bool	%M4.3	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P7	Bool	%M4.4	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P8	Bool	%M4.5	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P9	Bool	%M4.6	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P10	Bool	%M4.7	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P11	Bool	%M5.0	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P12	Bool	%M5.1	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P13	Bool	%M5.2	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P14	Bool	%M5.3	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P15	Bool	%M5.4	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P16	Bool	%M5.5	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P17	Bool	%M5.6	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P18	Bool	%M5.7	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P19	Bool	%M6.0	<input type="checkbox"/>	Lugar
	P20	Bool	%M6.1	<input type="checkbox"/>	Transição
	T1	Bool	%M6.2	<input type="checkbox"/>	Transição
	T2	Bool	%M6.3	<input type="checkbox"/>	Transição
	T3	Bool	%M6.4	<input type="checkbox"/>	Transição
	T4	Bool	%M6.5	<input type="checkbox"/>	Transição
	T5	Bool	%M6.6	<input type="checkbox"/>	Transição
	T6	Bool	%M6.7	<input type="checkbox"/>	Transição
	T7	Bool	%M7.0	<input type="checkbox"/>	Transição
	T8	Bool	%M7.1	<input type="checkbox"/>	Transição
	T9	Bool	%M7.2	<input type="checkbox"/>	Transição
	T10	Bool	%M7.3	<input type="checkbox"/>	Transição
	T11	Bool	%M7.4	<input type="checkbox"/>	Transição
	T12	Bool	%M7.5	<input type="checkbox"/>	Transição

	T13	Bool	%M7.6	<input type="checkbox"/>	Transição
	T14	Bool	%M7.7	<input type="checkbox"/>	Transição
	T15	Bool	%M8.0	<input type="checkbox"/>	Transição
	T16	Bool	%M8.1	<input type="checkbox"/>	Transição
	T17	Bool	%M8.2	<input type="checkbox"/>	Transição
	T18	Bool	%M8.3	<input type="checkbox"/>	Transição
	T19	Bool	%M8.4	<input type="checkbox"/>	Transição
	B1	Bool	%M24.0	<input type="checkbox"/>	Evento externo abrir válvula água
	B2	Bool	%M24.1	<input type="checkbox"/>	Evento válvula água aberta
	B4	Bool	%M24.2	<input type="checkbox"/>	Evento externo desligar bomba água
	B5	Bool	%M24.3	<input type="checkbox"/>	Evento válvula fechada água
	B6	Bool	%M24.4	<input type="checkbox"/>	Evento externo abrir válvula óleo
	B7	Bool	%M24.5	<input type="checkbox"/>	Evento válvula óleo aberta
	B9	Bool	%M24.6	<input type="checkbox"/>	Evento externo desligar bomba óleo
	B10	Bool	%M24.7	<input type="checkbox"/>	Evento válvula fechada óleo
	B11	Bool	%M25.0	<input type="checkbox"/>	Evento externo abrir válvula gás
	B12	Bool	%M25.1	<input type="checkbox"/>	Evento válvula gás aberta
	B15	Bool	%M25.2	<input type="checkbox"/>	Evento externo desligar compressor gás
	B17	Bool	%M25.3	<input type="checkbox"/>	Evento válvula fechada gás
	OSR1	Bool	%M25.4	<input type="checkbox"/>	contato P_trig
	OSR2	Bool	%M25.5	<input type="checkbox"/>	contato P_trig
	OSR3	Bool	%M25.6	<input type="checkbox"/>	contato P_trig
	OSR4	Bool	%M25.7	<input type="checkbox"/>	contato P_trig
	OSR5	Bool	%M26.0	<input type="checkbox"/>	contato P_trig
	OSR6	Bool	%M26.1	<input type="checkbox"/>	contato P_trig
	M200	Bool	%M200.0	<input type="checkbox"/>	
	M200_1	Bool	%M200.1	<input type="checkbox"/>	
	M200_2	Bool	%M200.2	<input type="checkbox"/>	
	M200_3	Bool	%M200.3	<input type="checkbox"/>	
	M200_4	Bool	%M200.4	<input type="checkbox"/>	
	M200_5	Bool	%M200.5	<input type="checkbox"/>	
				<input type="checkbox"/>	