

ANDRÉ VINÍCIUS VIACAVA PASSANESI
VINCENT YUKIO DONOMAI

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS DE CONTROLE PARA
ROTINAS DE MANUTENÇÃO APLICADAS A DISPOSITIVOS DE
ASSISTÊNCIA VENTRICULAR

São Paulo
2012

ANDRÉ VINÍCIUS VIACAVA PASSANESI
VINCENT YUKIO DONOMAI

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS DE CONTROLE PARA
ROTINAS DE MANUTENÇÃO APLICADAS A DISPOSITIVOS DE
ASSISTÊNCIA VENTRICULAR

Monografia do Trabalho de Conclusão
de Curso apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como requisito parcial para a
graduação em engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Diolino José Santos Filho

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Passanesi, André Vinicius Viacava

Desenvolvimento de algoritmos de controle para rotinas de manutenção aplicadas a DAV's / A.V.V. Passanesi, V.Y.

Donomai. -- São Paulo, 2012.

106 p.

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

1.Coração artificial 2.Manutenção preditiva 3.Redes de Petri I. Donomai, Vincent Yukio II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Hamilton e Nilde, e meus irmãos,
Thaís e Eduardo, pelo incentivo que me deram
para buscar meus sonhos; e à Patrícia, pelo
apoio e carinho durante estes anos.

André Vinícius Viacava Passanesi

A Esther que me apóia pelo meu caminho.

Vincent Yukio Donomai

AGRADECIMENTOS

Ao professor Diolino José dos Santos Filho pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Ao colega André Cezar Martins Cavalheiro e à equipe dos Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia pelo auxílio no desenvolvimento do presente trabalho.

Por fim, um agradecimento à Escola Politécnica da USP, em especial ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, que institucionalmente viabilizaram este trabalho, e à FAPESP por financiarem este projeto.

RESUMO

Um dos grandes desafios para o uso de Dispositivos de Assistência Ventricular (DAV) é manter a sua disponibilidade de operação para um paciente, ainda que determinadas falhas ocorram e que não puderam ser tratadas pelo sistema de controle de regeneração do mesmo. Observou-se que, nestas situações, embora todas as ações de controle tenham sido tomadas, o sistema pode não atuar conforme o esperado e este comportamento inadequado de um DAV pode colocar a vida do paciente em risco. Por este motivo, desenvolveu-se este trabalho para propor-se um modelo de manutenção híbrido para manter a disponibilidade destes dispositivos. Para alcançar este modelo, uma abordagem sistemática que considera as necessidades do paciente é apresentada. Um estudo a priori dos possíveis modos de falha do sistema é necessário para a metodologia adotada neste trabalho. Inicialmente, realiza-se um estudo das características de cada modo de falha para selecionar a política de manutenção mais apropriada para tratar a falha e manter a disponibilidade do dispositivo. Uma vez definida a política de manutenção, as ações específicas de atuação para cada falha são descritas utilizando uma representação em de Redes de Petri de alto nível, levando à construção de modelos lógicos das atividades sequenciais que compõe uma rotina de manutenção para o DAV. A partir de um procedimento de refinamento sucessivo destes modelos, gera-se os algoritmos que representam as rotinas de controle. Assim, implementou-se os algoritmos no controlador do DAV e realizou-se testes in vitro para validar os modelos e a metodologia propostos. O DAV estudado neste trabalho está em desenvolvimento no Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia.

Palavras chave: Dispositivo de Assistência Ventricular (DAV). Manutenção corretiva. Manutenção preditiva. Controle de SED.

ABSTRACT

One of the major challenges of Ventricular Assist Device (VAD) usage is maintaining its operation availability even if certain failures that could not be treated by the regenerative control system occur. It was observed that in these situations, although all control action have been taken, the system may not work as expected and that this inappropriate behavior can put a patient's life at risk. For this reason, this study was developed to propose a hybrid maintenance model in order to maintain the devices availability. To reach this model, a systematic approach is presented which considers the needs of the patient. As an input to the methodology adopted in this paper, a study of possible failure modes of this system is necessary. Initially, a study of the characteristics of each failure mode is done in order to select the most adequate maintenance policy for the fault in order to maintain the device's availability. Upon definition of the maintenance policy, the specific actions for each failure were described using a high-level representation of Petri nets, leading to the construction of a logical model of sequential activities that make up a maintenance routine for the VAD. By means of a procedure for the successive refinement of these models, the algorithms that represent the control routines were generated. Thus, the algorithms were implemented in the VAD's controller and in vitro tests were done to validate the models and methodology. The VAD studied is in development at the Institute Dante Pazzanese of Cardiology.

Keywords: Ventricular Assist Devices (VAD). Corrective Maintenance. Predictive Maintenance. DEVS control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - DAV estudado neste trabalho (BOCK, 2011).....	12
Figura 2 - Elemento Atividade (a), Elemento Distribuidor (b), Arco Orientado (c).	20
Figura 3 - Método para definição de procedimentos de manutenção.	25
Figura 4 – (a) arco habilitador. (b) modelagem de um arco habilitador no PIPE.....	34
Figura 5 – Simulador Cardiovascular Híbrido para DAVs do IDPC.....	37
Figura 6 – Controlador local utilizado nos testes in vitro.....	38
Figura 7 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Obstrução na Cântula".	39
Figura 8 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Desconexão na Cântula".	40
Figura 9 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Disparo do Motor por Mudança de Comportamento do Paciente".	41
Figura 10 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Desacoplamento Repentino do Motor".	41
Figura 11 – Placa com LEDs e Botões para simular as saídas e entradas das rotinas de manutenção.	42
Figura 12– Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Sem Corrente nos Sensores".	45
Figura 13 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Sensores Descalibrados".	46
Figura 14 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Sensores Descalibrados".	47
Figura 15 - Tratamento da falha “Obstrução na Cântula”	55
Figura 16 - Tratamento da falha “Desconexão da Cântula por Motivos Aleatórios”.	55
Figura 17 - Tratamento da falha “Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente”.	55
Figura 18 - Tratamento da falha “Desacoplamento Repentino do Motor”.	56
Figura 19 - Tratamento da falha “Falha na Alimentação”	56
Figura 20 - Tratamento da falha “Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico”	57
Figura 21 - Tratamento da falha “Queima do Motor”	57
Figura 22 - Tratamento da falha “Controle Supervisório não Atua”	57
Figura 23 - Tratamento da falha “Sem Corrente nos Sensores”	58
Figura 24 - Tratamento da falha “Desconexão da Cântula”.	58
Figura 25 - Tratamento da falha “Sensores Descalibrados”	58
Figura 26 - Tratamento da falha “Disparo do Motor por Falha nos Sensores”	59
Figura 27 - Tratamento da falha “Baixa Rotação do DAV”	59
Figura 28 - Tratamento da falha “Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético”	60
Figura 29 - Tratamento da falha “Baixa Rotação do DAV”	60
Figura 30 - Rede de Petri Interpretada da falha “Obstrução na Cântula”	61
Figura 31 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desconexão da Cântula por Motivos Aleatórios”	61
Figura 32 - Rede de Petri Interpretada da falha “Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente”	62

Figura 33 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desacoplamento Repentino do Motor” .	62
Figura 34 - Rede de Petri Interpretada da falha “Falha na Alimentação” .	63
Figura 35 - Rede de Petri Interpretada da falha “Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico” .	63
Figura 36 - Rede de Petri Interpretada da falha “Queima do Motor” .	64
Figura 37 - Rede de Petri Interpretada da falha “Controle Supervisório não Atua” .	64
Figura 38 - Rede de Petri Interpretada da falha “Sem Corrente nos Sensores” .	65
Figura 39 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desconexão da Cânula” .	65
Figura 40 - Rede de Petri Interpretada da falha “Sensores Descalibrados” .	66
Figura 41 - Rede de Petri Interpretada da falha “Disparo do Motor por Falha nos Sensores” .	66
Figura 42 - Rede de Petri Interpretada da falha “Baixa Rotação do DAV” .	67
Figura 43 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético” .	68
Figura 44 - Rede de Petri Interpretada da falha “Baixa Rotação do DAV” .	68
Figura 45 – Grafo de alcançabilidade da falha “Obstrução na Cânula” .	93
Figura 46 – Grafo de alcançabilidade da falha “Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios” .	93
Figura 47 – Grafo de alcançabilidade da falha “Disparo do Motor por Mudança de Comportamento do Paciente” .	93
Figura 48 – Grafo de alcançabilidade da falha “Desacoplamento Repentino do Motor” .	94
Figura 49 – Grafo de alcançabilidade da falha “Falha na Alimentação” .	94
Figura 50 – Grafo de alcançabilidade da falha “Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico” .	94
Figura 51 – Grafo de alcançabilidade da falha “Queima do Motor” .	95
Figura 52 – Grafo de alcançabilidade da falha “Controle Supervisório Não Atua” .	95
Figura 53 – Grafo de alcançabilidade da falha “Sem Corrente nos Sensores” .	95
Figura 54 – Grafo de alcançabilidade da falha “Baixa Rotação do DAV” .	96
Figura 55 – Grafo de alcançabilidade da falha “Desalinhamento do Rotor Causando Desalinhamento Magnético” .	96
Figura 56 – Grafo de alcançabilidade da falha “Fim da Bateria” .	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DAV	Dispositivo de Assistência Ventricular
SED	Sistema de Eventos Discretos
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
RdP	Rede de Petri
C/E	Condição-Evento
CLP	Controlador Lógico Programável
IEC	International Electrotechnical Commission
HAZOP	Hazard and Operability
SIS	Sistema Instrumentado de Segurança
PIPE	Platform Independent Petri Net Editor
LDMicro	Ladder for Microcontrollers
PIC	Peripheral Interface Controller (Microchip Technology)
AVR	Referência a família de microcontroladores da Atmel
IDPC	Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	3
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Motivação.....	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivo	14
1.4 Organização do texto.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 Manutenção.....	17
2.2 Modelagem em Redes de Petri.....	19
2.3 Refinamento de Redes de Petri de Alto Nível para Redes Interpretadas C/E	21
2.5 Transcrição de Redes de Petri para Programas de Controle.....	22
3. METODOLOGIA ADOTADA	25
4. CARACTERIZAÇÃO DAS FALHAS DO SISTEMA	27
5. MODELAGEM DAS ROTINAS DE MANUTENÇÃO PROPOSTAS.....	32
6. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE PETRI	34
7. TRANSCRIÇÃO DOS MODELOS E IMPLEMENTAÇÃO EM MICROCONTROLADOR	36
8. TESTES IN VITRO E ANÁLISE DAS ROTINAS.....	37
CONCLUSÃO	49
BIBLIOGRAFIA.....	51
APÊNDICE A – REDES DE PETRI.....	55
APÊNDICE B – DIAGRAMAS LADDER	69
APÊNDICE C – GRAFOS DE ALCANÇABILIDADE.....	93
ANEXO A – ESTUDO HAZOP DO DAV EM ESTUDO	97

1. INTRODUÇÃO

Ao analisar a medicina moderna, nota-se que esta tem sido auxiliada pela engenharia nos mais diversos aspectos. Um exemplo da parceria entre estas duas grandes áreas do conhecimento são os Dispositivos de Assistência Ventricular (DAVs), utilizados para auxiliar o bombeamento de sangue em pacientes que apresentam insuficiência cardíaca (DINKHUYSEN, 2007; ANDRADE, 1999). Sua finalidade é a assistência ventricular de longa duração para pacientes à espera de um transplante, ou durante sua recuperação, ou o tempo que durar sua terapia, uma vez que o uso deste dispositivo pode levar à recuperação do músculo miocárdio.

Historicamente, a primeira aplicação bem sucedida de um dispositivo para a assistência ventricular direita, caracterizada pela situação do DAV entre o átrio direito e o tronco pulmonar, foi realizada pelo Dr. DeBakey em 1967 nos EUA (NOSÉ, 2003). Já no Brasil, despertou-se o interesse por DAVs durante a década de 80, ao observar o sucesso obtido pelo coração artificial de Jarvik e DeVries em 1982 (NOVELLO, 2000). Atualmente, existem três classificações desses dispositivos quanto ao seu tipo de fluxo, podendo ser então de fluxo pulsátil, contínuo ou por contra pulsação.

Este trabalho encontra-se voltado a uma bomba de sangue centrífuga, sendo, portanto, de fluxo contínuo, implantável, acoplada magneticamente a um motor de corrente contínua, sem escovas (*brushless*), que está sendo desenvolvido no Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (ANDRADE, 1999; BOCK, 2011). A Figura 1 apresenta uma ilustração do DAV estudado neste trabalho.

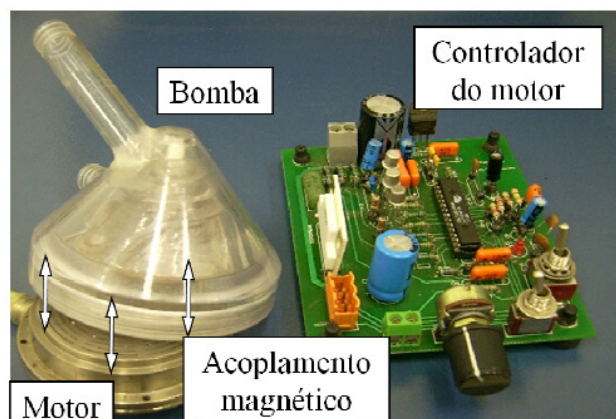


Figura 1 - DAV estudado neste trabalho (BOCK, 2011)

1.1 Motivação

O Projeto Temático FAPESP “Sistemas propulsores eletromagnéticos implantáveis para dispositivos de assistência circulatória sanguínea uni e biventricular ou coração artificial”, que teve início em 2008 e conclusão em 2011, surgiu com o objetivo de desenvolver novas tecnologias, componentes e subsistemas para uma bomba centrífuga implantável para assistência ventricular, de longa duração, para pacientes à espera de um transplante ou durante o tempo que durar sua terapia, procurando o aprimoramento dos DAVs utilizados no Brasil no sentido de aumentar a qualidade de vida e segurança do paciente. Assim, a continuação de pesquisas para verificar e aprimorar os resultados anteriormente obtidos é de extrema valia.

Atualmente, existem alguns DAVs que apresentam módulos de controle capazes de regular sua velocidade de acordo com o comportamento do corpo (GRIFFITH et al, 2001; 2001; ANTAKI, 2003; YI, 2007). Observa-se também que existem trabalhos que propõem uma arquitetura de controle de maior complexidade que considera a inserção de um sistema de segurança para prevenir falhas que coloquem a vida do paciente em risco (CAVALHEIRO, 2010). Por sua vez, há uma carência de trabalhos que tratem da questão de garantir a operabilidade regular destes sistemas envolvendo questões de variação do comportamento em função do tempo de uso do dispositivo. Assim, para arquiteturas de controle de sistemas desta natureza, surge a necessidade de uma rotina de manutenção, que se adéqua ao comportamento dinâmico destes dispositivos, para evitar falhas que possam comprometer o funcionamento do DAV.

De acordo com Nepomuceno (1999), manutenção preditiva é a realização de um monitoramento regular das condições estruturais e comportamentais de um equipamento em conjunto com reparos programados deste. Por este motivo, tem-se que com este tipo de manutenção, a confiabilidade do equipamento aumenta (MATUSHESKI, 1999). Desta forma, nota-se a importância de um monitoramento e de procedimentos de testes de aspectos específicos do DAV.

Para preservar a vida do paciente que utiliza um DAV, no sentido de aumentar a confiabilidade do controle do fluxo sanguíneo, é interessante então

adaptar o conceito de manutenção preditiva, cujo objetivo é manter o comportamento dinâmico apresentado pelo sistema na melhor condição para sua utilização.

1.2 Justificativa

O mau funcionamento e/ou o comportamento inadequado de um DAV pode colocar a vida do paciente em risco (BOCK, 2008; BOCK 2011). Este fato já é suficiente para justificar a pesquisa de novas soluções que provoquem uma amenização deste tipo de ocorrência. O presente trabalho vem contribuir exatamente neste aspecto, propondo uma extensão na aplicação do conceito de manutenção para o caso de pacientes com DAV implantado.

Assim, neste trabalho é proposta a implantação de algoritmos de manutenção no controlador de um DAV, aplicando desta forma o conceito de manutenção à realidade destes dispositivos. Desta forma, aumenta-se a confiabilidade e segurança do DAV, aspectos que são claramente desejáveis dada a aplicação crítica deste.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo apresentar e validar um modelo de manutenção para DAVs de bomba de sangue centrífuga implantável acoplada magneticamente a motores de corrente contínua e sem escovas. Neste contexto, são desenvolvidos os procedimentos de manutenção e os respectivos algoritmos de controle que os governam. Estes algoritmos representam a dinâmica de um conjunto de testes adequado para a realização da manutenção desta classe de DAVs implantados.

Ressalta-se que para analisar-se a realidade de operação destes dispositivos, deve-se considerar aspectos relacionados ao estado de saúde destes pacientes, com suas cardiopatias e os riscos inerentes a esta situação para estabelecer

parâmetros relacionados à periodicidade e prioridade de ações corretivas e preventivas.

Para atingir-se este objetivo é proposto o seguinte conjunto de metas:

- Estudo de DAVs considerando aspectos estruturais e comportamentais;
- Estudo do conceito de manutenção;
- Estudo de técnicas de modelagem;
- Adequação do conceito de manutenção no contexto do trabalho;
- Análise das características dos possíveis modos de falhas do sistema;
- Definição do conjunto de testes que devem suportar o programa de manutenção híbrida;
- Modelagem detalhada de cada um dos procedimentos de teste para instruir equipes médicas.
- Transcrição dos modelos levantados em algoritmos para a criação de um módulo de manutenção no controlador do dispositivo.

Assim, para atingir estas metas, foram previstas as seguintes etapas:

1. Levantamento bibliográfico e estudo dos tópicos necessários
2. Caracterização dos modos de falha de um DAV implantado;
3. Definição da lógica de procedimentos para a verificação do comportamento do sistema;
4. Detalhamento dos modelos procedimentais;
5. Transcrição destes modelos para algoritmos de controle;
6. Simulações computacionais dos algoritmos de controle levantados;
7. Testes in vitro dos algoritmos de controle;
8. Fechamento do projeto com redação da monografia.

1.4 Organização do texto

No Capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos utilizados ao longo deste trabalho, sendo eles conceitos de manutenção, modelagem de sistemas a eventos discretos utilizando Redes de Petri e a transcrição destes modelos em algoritmos de controle. Em seguida, no Capítulo 3, é apresentada a metodologia utilizada no trabalho. O Capítulo 4 apresenta a caracterização das falhas do sistema e a metodologia utilizada para a seleção da política de manutenção adequada para tratar cada falha e no Capítulo 5 são descritos os modelos em Redes de Petri de alto e baixo nível das rotinas de manutenção em questão. O Capítulo 6 apresenta então as simulações e análises destas Redes de Petri geradas para validar o comportamento destas. No Capítulo 7, são apresentados os algoritmos de manutenção obtidos através da transcrição dos modelos em Redes de Petri para linguagem Ladder e os meios utilizados para implementá-los em microcontroladores. No Capítulo 8 apresenta-se o resultado dos testes in vitro e a análise destes. Por fim, no Capítulo 9 encontra-se a conclusão do trabalho e no Capítulos 10 são apresentadas as referências bibliográficas deste.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manutenção

A *European Federation of National Maintenance Societies* (EFNMS) define manutenção como “Todas as ações que tem como objetivo manter ou retornar um item no ou ao estado no qual este possa desempenhar a função requerida. Estas ações incluem a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, gerenciais e de supervisão correspondentes” (EN 13306, 2001). Deste modo, temos que manutenção não é apenas o ato de reparar algo após este entrar em estado de falha, mas sim o monitoramento e a prevenção de que esta falha ocorra. Por este motivo, existem diferentes políticas de manutenção que podem ser adotadas para um sistema. A seleção destas políticas é baseada nas informações técnicas deste sistema, nas características de suas falhas e na viabilidade da política desejada (KELLY, 2006). As três principais técnicas encontradas na literatura são as políticas corretiva, preventiva e preditiva e, por isso, serão as abordadas neste trabalho.

Tem-se então, de modo simplificado, as seguintes definições destas políticas (CARDOSO, 2004):

- Política de manutenção corretiva - caracterizada pela intervenção no sistema após a ocorrência da falha.
- Política de manutenção preventiva - caracterizada pela intervenção no sistema a períodos fixos por meio de tarefas pré-determinadas.
- Política de manutenção preditiva - dada pelo monitoramento e, com base no estado do sistema, a dedução do momento de intervenção.

Assim, antes de selecionar a política que será adotada, deve-se fazer um detalhamento melhor das vantagens e desvantagens de cada política assim como suas aplicabilidades.

A política de manutenção corretiva é notória por ser a política com o maior prejuízo possível. Isto ocorre pois nela tem-se todos os efeitos da falha, já que esta

terá ocorrido, e da mobilização da equipe para restaurar o sistema ao estado desejado. Apesar disto, esta é a única política capaz de tratar falhas que são aleatórias e ocorrem instantaneamente, ou seja, falhas que não ocorrem de modo periódico, o que possibilitaria uma intervenção em períodos fixos, e falhas que não possuem tempo de desenvolvimento, que possibilitaria sua detecção antes da ocorrência. Observa-se então que políticas de manutenção preventiva e preditiva são ineficientes quando tratando falhas classificadas desta maneira, sendo aceitável apenas a manutenção corretiva destas. Um exemplo clássico de sistema que possui falhas aleatórias e sem tempo de desenvolvimento são sistemas eletrônicos, que apresentam funcionamento perfeito em um momento e, no instante seguinte, podem parar de funcionar.

A política de manutenção preventiva é uma política largamente utilizada na indústria por prevenir os efeitos da falha num sistema e possibilitar um melhor gerenciamento dos momentos de intervenção. Esta política requer então um estudo do momento ideal para que a intervenção tenha o menor gasto de recursos, uma vez que no momento de intervenção realizar-se-á a troca das peças avaliadas sem considerar o seu estado. Vale enfatizar que a manutenção preventiva só deve ser aplicada quando tratando de um sistema com taxa de falhas crescente. Caso a taxa de falha seja decrescente, ou seja, o número de falhas diminui com o passar do tempo, a intervenção irá prejudicar este sistema, deixando-o mais propício a falhas. Exemplos de manutenção preventiva são lubrificação, ajustes e recondicionamento de máquinas.

Finalmente, a política de manutenção preditiva é uma política baseada na condição do parâmetro avaliado. Dado este fato, para adotar esta política deve-se ter conhecimento suficiente do sistema para possibilitar a seleção de seus parâmetros vitais. Se estes parâmetros forem selecionados de maneira equivocada, esta política de manutenção poderá levar ao mau funcionamento do sistema, uma vez que os parâmetros avaliados podem fornecer informações errôneas sobre o estado deste sistema. Outro aspecto importante que deve ser enfatizado é a necessidade de que as falhas possuam tempo de desenvolvimento, possibilitando assim sua detecção através de rotinas de testes pré-determinadas. Caso não tiver tempo de desenvolvimento de falha, o monitoramento não será capaz de apresentar indícios de que o sistema entrará no estado de falha, tornando a política ineficaz. Por fim, tem-se também a necessidade de critérios e interpretações da medição dos

parâmetros vitais, que seriam responsáveis pela definição do momento de intervenção. Novamente, temos que caso estes critérios e interpretações estejam equivocados, provocar-se-á o mau desempenho desta política de manutenção. Alguns exemplos de aplicação desta política são análises de vibração, ultrassom, inspeção visual e monitoramento de processo.

Neste contexto, observa-se que, apesar de desejar-se a política de manutenção preditiva para o sistema trabalhado, esta requer um complexo sistema de diagnóstico para detectar o processo de desenvolvimento das falhas que as outras políticas não necessitam, além de não ser aplicável para todos os tipos de falhas. É importante destacar também que para sistemas onde desconhecemos os parâmetros vitais e seus modos de falha, a manutenção corretiva gera um registro de ocorrências capaz de fornecer informações cruciais para o desenvolvimento de um estudo destas características que poderá aprimorar continuamente o processo de atribuição de políticas de manutenção condizentes com os perfis de falhas. Desta forma, dependendo da complexidade de um sistema, se este envolver uma diversidade de modos de falha, torna-se necessário um método dinâmico de seleção da política de manutenção que se adéqua a esta realidade.

2.2 Modelagem em Redes de Petri

Sistemas dinâmicos podem evoluir de estado a partir da ocorrência de eventos, sendo classificados, do ponto de vista teórico, como Sistemas a Eventos Discretos (SED) (MIYAGI, 2007).

Visto que as falhas podem ser interpretadas como eventos que causam perturbação no sistema, as rotinas de manutenção são inicializadas por estes eventos e podem, portanto, ser classificadas como uma classe de SEDs. Sendo assim, para modelar a lógica destes procedimentos de manutenção é possível utilizar-se Redes de Petri (REISIG, 1981).

Semanticamente, uma Rede de Petri (RdP) é um grafo orientado bipartido que possui elementos passivos e ativos interligados por arcos orientados que indicam o fluxo de informação no sistema. Há várias classes de Redes de Petri que

podem ser aplicadas para modelagem, dependendo das características do sistema que se deseja estudar (MURATA, 1989; REISIG, 1992; ROZEMBERG, 1998).

Existem redes de alto nível que representam conceitualmente a lógica e sequenciamento de atividades podendo modelar paralelismo, conflitos e assincronismos. Por sua vez, existem redes marcadas do tipo Lugar/Transição que possuem capacidade de acumular múltiplas marcas em cada lugar e podem associar pesos aos arcos orientados. Para o controle de SEDs, comumente utiliza-se redes interpretadas do tipo Condição/Evento (C/E) que são redes que possuem elementos apropriados para representarem sinais físicos externos e são redes binárias em que seus lugares não podem acumular mais de uma marca.

Assim, para a modelagem das rotinas de manutenção concernentes a este trabalho propõe-se primeiramente a utilização de uma classe de Redes de Petri de alto nível. Nos modelos destas RdPs pode-se ter inscrições em linguagem natural ou formal associadas aos seus elementos - distribuidores, arcos e atividades - sendo este último fundamental, uma vez que uma atividade representa um macro-evento. A Figura 2 apresenta estes elementos. Estas redes descrevem atividades que podem representar diversos eventos e estados em macro-eventos, facilitando assim a modelagem de sistemas complexos aplicando o conceito de refinamento sucessivo (MIYAGI, 2007).

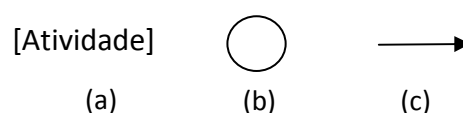


Figura 2 - Elemento Atividade (a), Elemento Distribuidor (b), Arco Orientado (c).

Com este refinamento, que será descrito na seção a seguir, é possível detalhar redes de alto nível em redes interpretadas do tipo condição/evento (C/E). A partir do momento em que se têm modelos em redes de Petri do tipo C/E é possível realizar a transcrição destes modelos em programas de controle. Portanto, em síntese utiliza-se refinamento sucessivo para obter-se um modelo em RdPs interpretadas. Como as RdPs de baixo nível possuem as características descritas anteriormente, é possível utilizar-se de uma metodologia que transforme estes modelos em programas de controle.

2.3 Refinamento de Redes de Petri de Alto Nível para Redes Interpretadas C/E

O processo de refinamento gradativo é descrito em Miyagi (2007) como um procedimento para, a partir da modelagem de um sistema, se obter uma rede que represente o sistema de controle e as interconexões existentes entre o controlador e o objeto de controle.

Assim, ao aplicar o processo de refinamento para as rotinas de manutenção levantadas, é possível obter uma Rede de Petri similar à rede C/E a menos de arcos habilitadores e inibidores.

O refinamento é então definido por cinco passos descritos a seguir:

1. Identificação dos principais fluxos de atividades - sendo conhecido o comportamento desejado do sistema, identifica-se seu(s) fluxo(s) de atividades;
2. Detalhamento dos fluxos - identificando-se os elementos ativos e passivos do sistema, cada fluxo é reescrito explicitando suas atividades e os elementos passivos são abstraídos como o estado entre estas atividades;
3. Detalhamento das atividades - cada atividade é então reescrita com um nível maior de detalhe e identificando os recursos necessários para cada etapa da atividade;
4. Introdução dos elementos de controle de recursos - a partir dos recursos identificados no passo anterior, é criado o lugar da rede que controla a alocação dos recursos, dado que a quantidade deles é finita e podem ser requisitados por diferentes atividades;
5. Indicação dos sinais de controle - por fim, são representadas as interações de cada atividade com dispositivos de comando, monitoração, atuação e detecção.

2.4 Validação de Modelos em Rede de Petri

Ao término da modelagem de uma Rede de Petri, é interessante avaliar certas características para se garantir o comportamento esperado da rede. No caso de se representar algoritmos de controle é necessário avaliar-se as seguintes propriedades:

- Alcançabilidade: um grafo de alcançabilidade é a representação de todos os estados alcançáveis a partir de uma determinada marcação inicial da Rede de Petri. A partir deste grafo é possível identificar “armadilhas” (ciclo de disparos de transições do qual não é possível sair) e “*deadlocks*” (estado da rede em que nenhuma transição pode ser disparada);
- Limitação: uma Rede de Petri é dita “*safe*” quando seus lugares sempre possuem no máximo uma marca;
- Vivacidade: uma transição é dita em “*deadlock*” quando ela nunca pode ser disparada, e é dita “*live*” se ela nunca fica em “*deadlock*”.

Assim, a partir da avaliação destas propriedades é possível observar se o modelo em Redes de Petri que representa o algoritmo do programa a ser executado no sistema de controle do DAV possui falhas de modelagem e/ou concepção.

2.5 Transcrição de Redes de Petri para Programas de Controle

Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) são ferramentas poderosas na área de automação (FREY, 2001) e possui cinco linguagens de programação padronizadas pela IEC 61131-3, sendo uma delas o Diagrama Ladder. Este se trata de uma linguagem gráfica e que suporta operações lógicas e funções complexas (MIYAGI, 2007).

A transcrição de Redes de Petri para algoritmos em Ladder é baseada em Mello et al (2011). O método se divide em quatro etapas:

1. Verificar quais transições estão habilitadas;
2. Disparo das transições habilitadas, com a criação de marcas nos lugares de saídas;
3. Ativação das saídas correspondentes aos lugares com marcas;
4. Inicialização das condições do sistema, correspondente ao estado inicial do sistema com as marcas iniciais da Rede de Petri.

Cada elemento da Rede de Petri (lugar e transição) possui pelo menos uma variável associada: cada lugar possui uma variável com o sufixo “Local” para indicar a presença de uma marca nele, e cada transição possui uma variável com o sufixo “Local” para indicar se está habilitada. Além destas variáveis, cada lugar ainda pode ter uma variável de saída associada a ele, e cada transição pode ter variáveis de entrada associadas a ela (correspondentes aos arcos habilitadores e/ou inibidores).

Cada etapa da transcrição está detalhada a seguir:

1. Habilitação das transições: cada transição da Rede de Petri é representada por uma bobina do tipo SET e associada a um *rung* no Diagrama Ladder. As pré-condições da transição são representadas como contatos NA (normalmente abertos) e as pós-condições como contatos NF (normalmente fechados). Similarmente, arcos habilitadores são representados por contatos NA e arcos inibidores como contatos NF. Por fim, para evitar que duas ou mais transições que estejam em situação de conflito de saída entre si sejam habilitadas conjuntamente, transições em conflito de saída são adicionadas como contatos NF. Em relação ao caso em que haja transições em conflito de entrada, após o SET da transição é feito o RESET das pré-condições.
2. Disparo das transições: cada transição é representada como um contato NA e seus lugares de saída como bobinas do tipo SET. Seguido do SET dos lugares de saída é feito o RESET da transição.
3. Ativação das saídas: cada variável de saída é representado como uma bobina comum e associada a um *rung*, e o lugar da Rede de Petri associado à variável é representado como um contato NA.
4. Inicialização do sistema: as marcas iniciais da Rede de Petri são geradas com o auxílio de um *rung* em que cada lugar da Rede de Petri é representado como um contato NF, e os lugares que possuem as marcas

iniciais são representados como bobinas do tipo SET. Assim, este *rung* só será acessado no primeiro ciclo do CLP quando todos os lugares estiverem vazios.

3. METODOLOGIA ADOTADA

A Figura 3 demonstra a metodologia utilizada neste trabalho para a construção de modelos de manutenção de sistemas complexos.

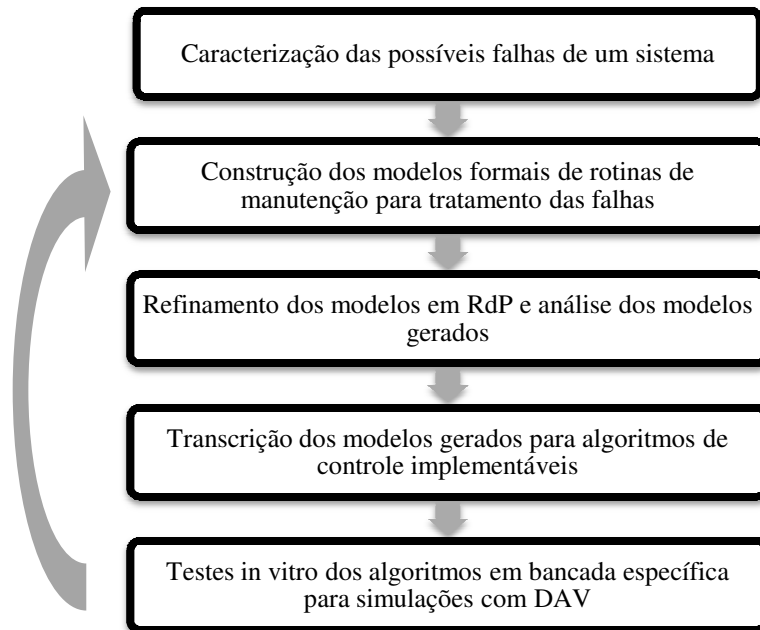


Figura 3 - Método para definição de procedimentos de manutenção.

Como entrada para a metodologia adotada neste trabalho, é necessário um levantamento dos possíveis modos de falha do sistema. Desta forma, utilizou-se o estudo *Hazard and Operability* (HAZOP) deste dispositivo (PACHLER, 2011), que possibilitou uma maior compreensão do comportamento do sistema como um todo e dos mecanismos de falha presentes neste, sendo possível então uma análise da natureza dos modos de falha apresentados no estudo. Assim, o estudo das características das falhas para a seleção da política de manutenção adequada é feito na primeira etapa.

Após esta avaliação, é possível definir as ações de manutenção que melhor trata cada falha avaliada, sendo estas ações condizentes com a política de manutenção selecionada com base nas características da falha estudada. Uma vez determinadas estas ações, cria-se o modelo em RdP de alto nível que representa a rotina de manutenção ideal para cada falha.

A partir do modelo levantado, realiza-se o refinamento sucessivo da RdP de alto nível para chegar-se a RdP de baixo nível necessária para obter-se o programa de controle que representará a rotina de manutenção. Utilizando a metodologia de transcrição apresentada na seção 2.4, obtém-se um programa na linguagem de programação ladder que pode ser implementado diretamente em um controlador.

Uma vez gerados os modelos em RdP de baixo nível é possível validá-los por meio de simulações computacionais, garantindo o funcionamento básico desejado. A partir deste modelo validado é obtido o programa de controle que pode ser verificado por meio de testes in vitro para a verificação do funcionamento do sistema em ambiente mais próximo ao real.

Esta metodologia é aplicável a sistemas complexos que possuem diversos tipos de elementos pois as técnicas e os conceitos considerados suportam estes tipos de sistemas. A forma sequencial dividida em etapas permite uma validação progressiva do modelo e possibilita uma abordagem sistematizada para a definição de rotinas de manutenção de um sistema. Outra vantagem desta metodologia é o dinamismo apresentado pela mesma, pois todas as etapas utilizam técnicas capazes de absorver alterações e evoluções de aspectos do sistema, além de permitir uma reavaliação dos modelos caso a verificação in vitro não atenda a algum requisito.

4. CARACTERIZAÇÃO DAS FALHAS DO SISTEMA

O dispositivo que está sendo estudado possui partes mecânicas e eletrônicas, tratando-se então de um sistema mecatrônico. Ambas estão sujeitas a falhas, porém as falhas oriundas de cada parte possuem características bastante distintas. Um sistema mecânico terá, mas não apenas, falhas associadas ao desgaste, que possuem tempo de desenvolvimento e não são aleatórias, uma vez que trata-se de um efeito acumulativo causado pelo uso. Assim, com a verificação do estado do componente, pode-se prever o momento que este entrará no estado de falha e intervir antes disso acontecer. Já as falhas eletrônicas tendem a ter um comportamento diferente. Como exemplo tem-se a queima de um sensor, uma falha instantânea e aleatória, sendo portanto indetectável. Por este motivo, criar uma rotina para verificar o estado do componente não se apresentará eficiente, pois este estará funcionando perfeitamente até o instante de sua falha.

Nota-se então que não há uma política de manutenção, dentre as apresentadas no Capítulo 2, que trate todas os modos de falha presente no sistema estudado, pois cada política é capaz de tratar apenas falhas com características específicas. Portanto, para tratar todos os modos de falha de um DAV implantado, é necessário criar um programa de manutenção que englobe diversas destas políticas de manutenção, sendo então um programa de manutenção híbrido. Abaixo estão listadas as 15 falhas avaliadas neste trabalho, que foram levantadas pelo estudo HAZOP do dispositivo estudado, presente em Pachler (2011).

- Obstrução na Cânula
- Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios
- Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente
- Desacoplamento Repentino do Motor
- Falha na Alimentação
- Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico
- Motor Queimado
- Controlador Supervisório não Atua
- Sem Corrente nos Sensores

- Desconexão das Cânulas
- Sensores Descalibrados
- Disparo do Motor por Falha nos Sensores
- Baixa Rotação do DAV
- Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético
- Fim da Bateria

Para cada um destas falhas, é necessário um método de seleção de política de manutenção adequada, assim adotou-se um método de pré-seleção da política de manutenção apresentado em Cardoso (2004), no qual, com base em características da falha, é possível realizar esta seleção. As características necessárias para a realização deste método são a aleatoriedade da falha e se esta possui tempo de desenvolvimento considerável ou se é definida como instantânea. A Tabela 1 apresenta o método utilizado neste trabalho, onde, com as características da falha analisada, encontra-se a política de manutenção adequada a esta.

Tabela 1 - Método para atribuição de políticas de manutenção. (CARDOSO, 2004)

Características da Falha	<i>Aleatória</i>	<i>Não Aleatória</i>
<i>Instantânea</i>	Corretiva	Preventiva
<i>Não Instantânea</i>	Preditiva	Preditiva/Preventiva

Utilizando a Tabela 1, caracterizou-se cada falha e definiu-se a política de manutenção adequada, obtendo-se o seguinte resultado:

Obstrução na Cânula

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do corpo humano;
- Não possui tempo de desenvolvimento;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios

Características:

- Falha aleatória;
- Não possui tempo de desenvolvimento pois esta falha é brusca;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do corpo humano;
- Não possui tempo de desenvolvimento pois é um disparo;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Desacoplamento Repentino do Motor

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do motor;
- Não possui tempo de desenvolvimento;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Falha na Alimentação

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do sistema elétrico;
- Não possui tempo de desenvolvimento (característica de falhas elétricas);

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do sistema elétrico;
- Não possui tempo de desenvolvimento (característica de falhas elétricas);

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Motor Queimado

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do motor ou do circuito elétrico;
- Não possui tempo de desenvolvimento (característica de falhas elétricas);

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Controlador Supervisório não Atua

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do sistema de controle;
- Não possui tempo de desenvolvimento (característica de falhas elétricas);

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Sem Corrente nos Sensores

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do sistema elétrico;
- Não possui tempo de desenvolvimento (característica de falhas elétricas);

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Corretiva

Desconexão das Cânulas

Características:

- Falha não aleatória causada por desgaste devido a movimentação do paciente;
- Possui tempo de desenvolvimento;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Preventiva dada a dificuldade de verificar o estado da conexão

Sensores Descalibrados

Características:

- Falha não aleatória causada pelo uso normal do sensor;

- Possui tempo de desenvolvimento;
- Política de manutenção adequada:
- Manutenção Preventiva

Disparo do Motor por Falha nos Sensores

Características:

- Falha aleatória com causa oriunda do sistema elétrico;
- Possui tempo de desenvolvimento pois a falha no sensor considerada é a descalibração;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Preditiva

Baixa Rotação do DAV

Características:

- Falha não aleatória causada pelo desgaste do rotor ou motor;
- Possui tempo de desenvolvimento;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Preditiva

Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético

Características:

- Falha não aleatória causada pelo desgaste do rotor;
- Não possui tempo de desenvolvimento;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Preditiva

Fim da Bateria

Características:

- Falha não aleatória causada pelo uso normal do DAV;
- Possui tempo de desenvolvimento;

Política de manutenção adequada:

- Manutenção Preditiva

5. MODELAGEM DAS ROTINAS DE MANUTENÇÃO PROPOSTAS

Uma vez selecionada as políticas de manutenção que tratarão cada falha, tornou-se possível a definição dos procedimentos de manutenção a serem tomados. Assim, constrói-se os modelos matemáticos das ações que devem ser realizada por meio da aplicação de RdP de alto nível de maneira a formalizar a representação semântica da mesma. Separou-se então a rotina de manutenção em seus elementos ativos e passivos, sendo que:

- Os elementos ativos correspondem às atividades que serão realizadas pertinentes à rotina em si.
- Os elementos passivos representam os estados intermediários onde se tomam decisões que definirão sequencialmente as próximas ações a serem executadas.

Como as ações de manutenção são baseadas na política de manutenção adequada para a falha que esta trata, os consequentes modelos em RdP terão aspectos que refletem as políticas selecionadas:

- Para uma política de manutenção corretiva, a RdP resultante terá início com a detecção da falha ocorrida e, a partir desta detecção, a realização da rotina de manutenção desta.
- O modelo em RdP de uma política de manutenção preventiva terá o início das ações pelo fim do tempo entre as intervenções e o encaminhamento do paciente ao hospital.
- Uma política de manutenção preditiva terá atividades de verificação do estado do componente que pode falhar para decidir se há a necessidade de troca ou não.

Como mencionado anteriormente, foram caracterizados 15 modos de falha distintos do sistema, sendo 9 destes tratáveis pela política de manutenção corretiva,

2 tratáveis pela política preventiva e 4 pela política preditiva. As Figuras 4 a 18 apresentam os modelos de manutenção gerados em Redes de Petri de alto nível.

Em seguida, conforme indicado na metodologia, realizou-se a aplicação do refinamento sucessivo das Redes de Petri de alto nível para encontrar as Redes de Petri interpretadas que as representam, mantendo a representação semântica das mesmas. Para isto, deve-se seguir os passos apresentados no Capítulo 2, cuja primeira etapa é a expansão de cada elemento ativo da RdP de alto nível e encontrar os seus subestados e ações.

Assim, abre-se o macro-evento em uma transição de entrada, seus lugares internos com transições internas e uma transição de saída deste. Os estados e transições internas modelam o macro-evento garantindo o comportamento esperado de ativação das saídas. Em seguida, verificam-se os sinais de controle, sejam eles entradas ou saídas, necessários para o funcionamento da rotina de manutenção.

Com este refinamento realizado, são obtidos os modelos de manutenção em RdP interpretada, que não são de fácil entendimento mas, por serem de nível mais baixo, podem ser convertidos em algoritmos de controle para a implementação no microcontrolador do DAV. No Apêndice A se encontram os modelos de manutenção em RdP interpretada para cada modelo de tratamento de falha desenvolvido.

6. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE PETRI

Para cada Rede de Petri obtida após o refinamento, foi realizada a simulação no software *Platform Independent Petri Net Editor* (PIPE) v2.5 rc5. Este software é *opensource* e possui módulos de avaliação de características das Redes de Petri.

Dentre os diferentes módulos disponíveis, foram utilizados:

- Classification: verificação se a Rede de Petri corresponde ao tipo C/E estendida (rede C/E com arcos habilitadores e inibidores);
- State Space Analysis: verificação se a rede é limitada (“*bounded*”), “*safe*”, e se possui “*deadlocks*”;
- Reachability Graph: verificação da existência de “armadilhas” na Rede de Petri.

Em relação à criação dos modelos das redes no software, este possui uma limitação pois não possui arcos habilitadores (apesar de possuir arcos inibidores). No entanto, esta deficiência foi facilmente sanada a partir da modelagem do comportamento de um arco habilitador conforme mostrado na Figura 4 abaixo.

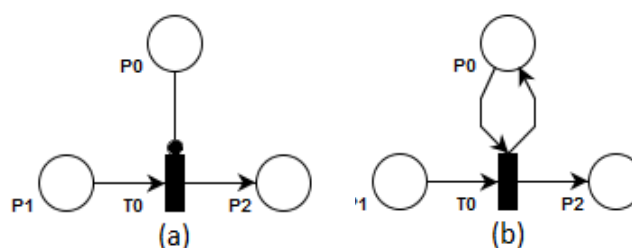


Figura 4 – (a) arco habilitador. (b) modelagem de um arco habilitador no PIPE.

Uma vez que para o software é relevante apenas a estrutura da Rede de Petri e sua marcação inicial, não se torna necessário realizar a mesma simulação para as rotinas de manutenção que resultaram na mesma rede tais como os casos das falhas: Sem Corrente nos Sensores, Desconexão da Cântula, e Sensores Descalibrados. Os resultados agrupados são mostrados na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – Resultados de Simulação em software PIPE

Petri Net Classification Results													
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.12	2.13	2.14	2.15
State Machine	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false
Marked Graph	false	true	true	false	false	false	true	false	true	false	false	false	false
Free Choice Net	false	true	true	false	false	false	true	false	true	false	false	false	false
Extended Free Choice Net	false	true	true	false	false	false	true	false	true	false	false	false	false
Simple Net	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true
Extended Simple Net	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true

Petri Net State Space Analysis Results													
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.12	2.13	2.14	2.15
Bounded	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true
Safe	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true	true
Deadlock	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false	false

Legenda

- 2.1 Obstrução na Cânula
- 2.2 Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios
- 2.3 Disparo do Motor por Mudança de Comportamento do Paciente
- 2.4 Desacoplamento Repentino do Motor
- 2.5 Falha na Alimentação
- 2.6 Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico
- 2.7 Queima do Motor
- 2.8 Controle Supervisório Não Atua
- 2.9 Sem Corrente nos Sensores
- 2.10 Desconexão da Cânula
- 2.11 Sensores Descalibrados
- 2.12 Disparo do Motor por Falhas no Sensores
- 2.13 Baixa Rotação do DAV
- 2.14 Desalinhamento do Rotor Causando Desalinhamento Magnético
- 2.15 Fim da Bateria

A partir destes resultados, é possível verificar que de fato todas as redes são limitadas e livres de *deadlocks*, além de corresponderem ao tipo de rede esperado para posterior transcrição em algoritmos de controle.

Em relação aos grafos de alcançabilidade, eles são apresentados abaixo e deles é possível verificar visualmente que não há “armadilhas” nas redes, pois os ciclos apresentados se referem ao próprio *loop* da rotina de manutenção. No Apêndice B se encontram os grafos de alcançabilidade gerados pelo PIPE.

7. TRANSCRIÇÃO DOS MODELOS E IMPLEMENTAÇÃO EM MICROCONTROLADOR

Uma vez asseguradas que as Redes de Petri obtidas correspondem às rotinas modeladas, através das simulações no software PIPE, foi então realizada a transcrição de cada uma das Redes de Petri interpretadas para diagramas Ladder. O método de transcrição foi descrito anteriormente e os resultados se encontram no Apêndice A deste presente trabalho.

Para a validação dos algoritmos em diagramas Ladder obtidos, foi utilizado o software *LDMicro* que é capaz de simular o comportamento de diagramas Ladder. O *LDMicro* é um software *opensource* e tem como principal função converter a lógica de um diagrama Ladder em linguagem de programação para outros tipos de microcontroladores que não PLC's. Ele foi desenvolvido para uso com microcontroladores PIC e AVR, mas possui um módulo que converte a lógica do diagrama para linguagem C pura.

Devido a esta capacidade do *LDMicro*, foi decidido utilizar o microcontrolador *Arduino*. O *Arduino*, além de ser compatível com os códigos em C gerados pelo *LDMicro*, também apresenta maiores recursos para futuras alterações e melhorias, e se mostra um hardware com maior confiabilidade de construção devido à qualidade de sua fabricação comparado com a construção de circuitos utilizando os microcontroladores PIC e AVR.

Para a implementação do diagrama Ladder no *Arduino*, foi necessário apenas escrever as definições das funções de entradas e saídas declaradas no código C gerado pelo *LDMicro*, e definir o intervalo de tempo entre cada varredura do diagrama ladder, chamada *Scan Cycle*.

8. TESTES IN VITRO E ANÁLISE DAS ROTINAS

Através da implementação dos algoritmos de manutenção no controlador do DAV, realizou-se testes in vitro para a verificação do comportamento dos algoritmos. Para estes testes, utilizou-se um simulador cardiovascular híbrido específico para testes com estes dispositivos, disponível no Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia (IDPC). O interesse em utilizar este tipo de simulador é a união das características vantajosas dos simuladores numéricos e físicos (FONSECA, 2012). Assim, com este simulador, foi possível replicar o comportamento de um coração insuficiente assistido pelo DAV em estudo e obter informações sobre o sistema, como pressão na aorta, pressão nos ventrículos esquerdo e direito e frequência cardíaca, enquanto eram executados os algoritmos de manutenção de cada falha. A Figura 5 ilustra este simulador com o DAV em estudo já acoplado.

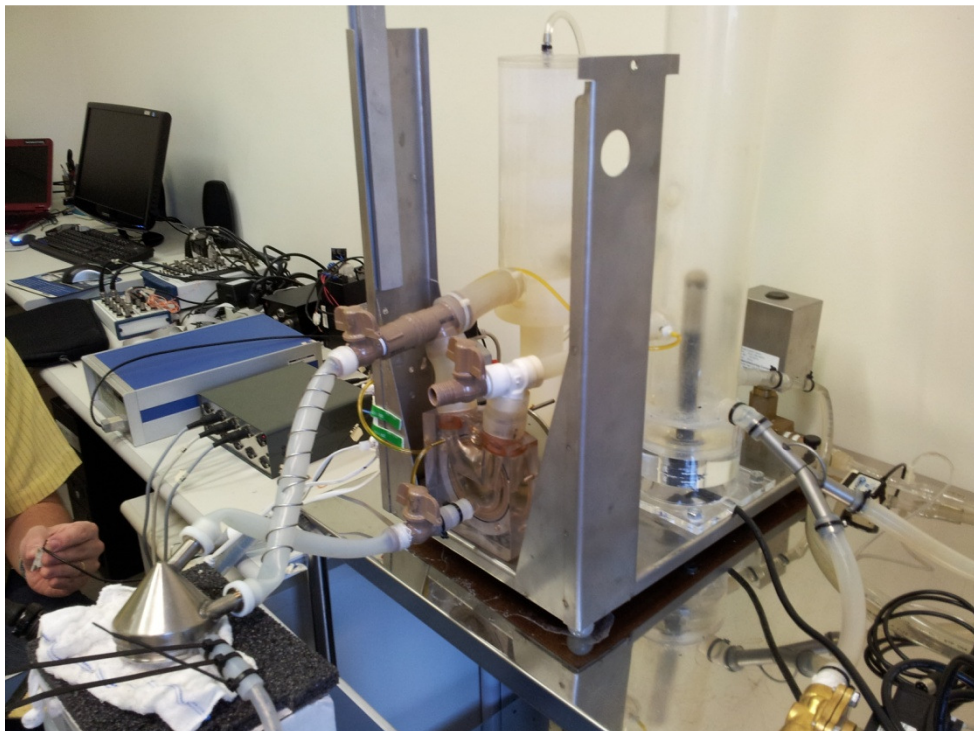


Figura 5 – Simulador Cardiovascular Híbrido para DAVs do IDPC.

Na arquitetura de controle do dispositivo adotada neste trabalho, o módulo de manutenção interage com o Sistema de Controle Supervisório, e não com o Sistema de Controle Local (CAVALHEIRO, 2011). Desta forma, o módulo de manutenção não

estabelece os *setpoints* de rotação da bomba de modo direto. Apesar disso, para poder realizar avaliações das rotinas de manutenção utilizando o simulador, é necessário atuar na rotação da bomba. Foram introduzidos então sinais de controle que atuam diretamente num controlador local para efeito de teste. O controlador local utilizado foi o *Digital EC Controller 50/5* da Maxon motor, ilustrado na Figura 6.

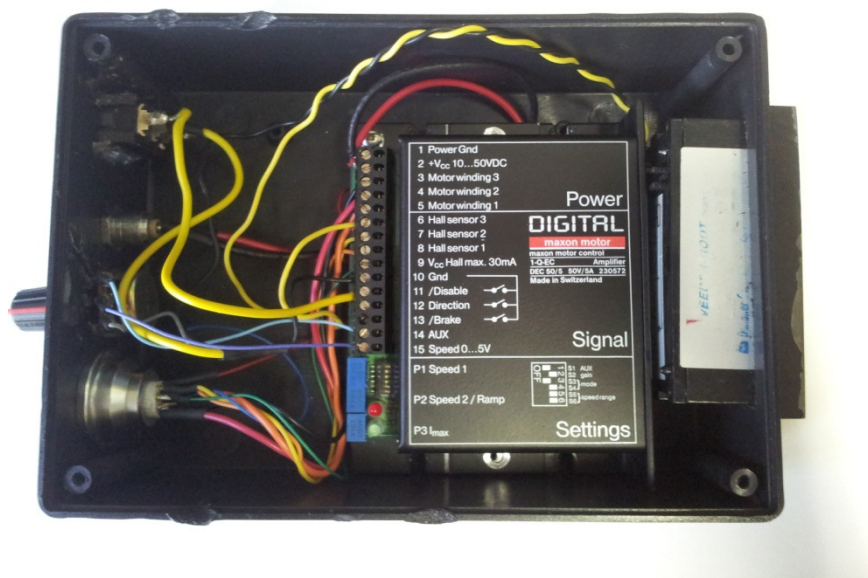


Figura 6 – Controlador local utilizado nos testes in vitro.

Por fim, para uma melhor visualização dos resultados das rotinas, ligou-se as saídas e as entradas do microcontrolador à LEDs e botões, respectivamente. Assim, pode-se simular os *inputs* e *outputs* do módulo de manutenção proposto. Com o microcontrolador Arduino ligado ao controlador local e a placa com LEDs e botões e o controlador local ligado a bomba, realizou-se os testes in vitro das rotinas de manutenção propostas. A seguir estão os resultados obtidos.

Falha 1 - Obstrução na cânula

A proposta de ação desta rotina é primeiramente tentar desentupir a cânula através do aumento da diferença de pressão entre a entrada e a saída da bomba, sendo necessário então a aceleração do rotor. Para a segurança do paciente, a bomba deve ser desacelerada até sua velocidade normal de operação após um certo período e, em seguida, deve-se verificar novamente se há obstrução. Caso a

obstrução for removida, esta rotina se encerra, caso contrário, há duas opções: repetir a rotina ou manter o dispositivo em uma velocidade segura e acionar um alarme indicando a necessidade de cirurgia. A Figura 7 apresenta a pressão aórtica medida no simulador durante a execução desta rotina.

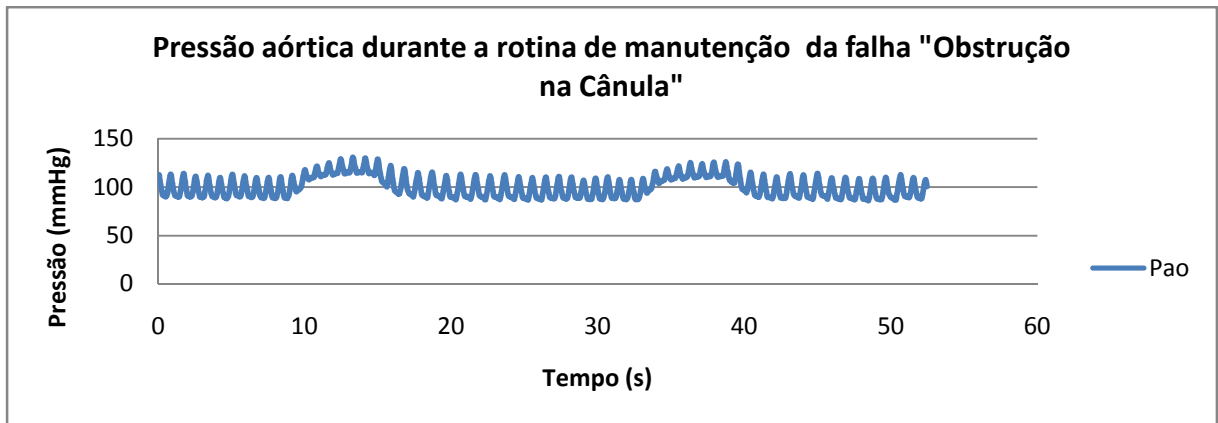


Figura 7 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Obstrução na Cânula".

Observa-se no gráfico o batimento cardíaco e um claro aumento na pressão arterial em dois momentos distintos, que indicam a aceleração do rotor do DAV numa rotina que foi executada duas vezes antes de ser concluída. Percebe-se, assim, que a rotina está se comportando da maneira desejada, cabendo a um médico a avaliação de tempo de aceleração, velocidades máxima e de segurança e o número de vezes que esta rotina pode ser repetida antes de acionar o alarme para o paciente ir ao hospital.

Falha 2 - Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios

Nesta rotina, deseja-se diminuir os graves riscos implicados por esta falha, pois, caso a cânula do dispositivo desconectar, o paciente terá hemorragia interna. Assim, propõe-se levar o DAV a um estado seguro nesta rotina. O responsável por este estado seguro é o Sistema de Controle Supervisório, sendo que o módulo de manutenção apenas indicará o estado de emergência para este sistema. Mesmo assim, para verificar a atuação da rotina de manutenção, fez-se uma simulação desta levando o DAV à uma velocidade de segurança, abaixo da velocidade normal de trabalho deste. A Figura 8 ilustra o resultado.

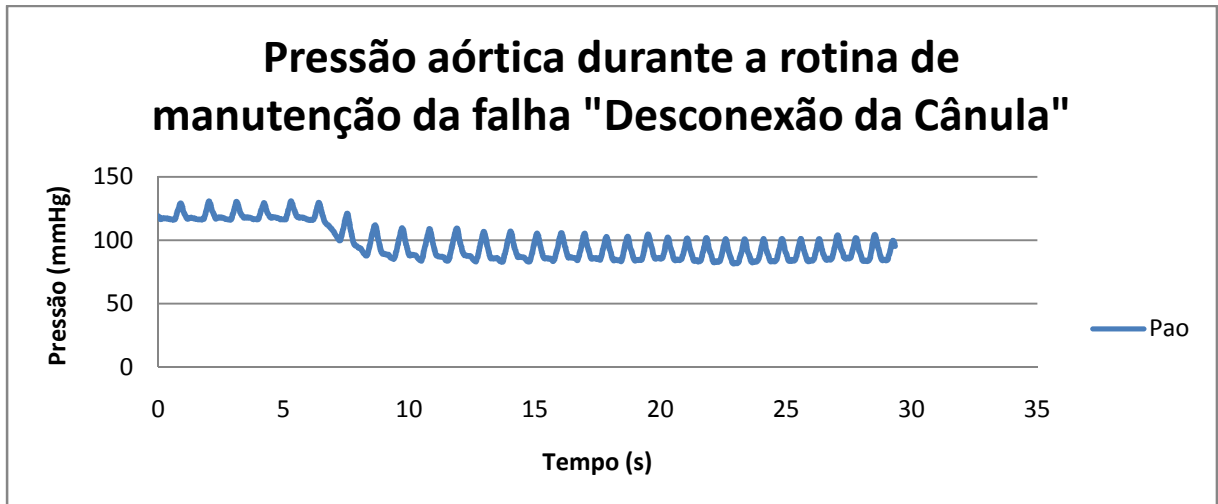


Figura 8 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Desconexão na Cânula".

Observa-se neste gráfico a diminuição na pressão arterial, indicando que o DAV diminuiu sua velocidade, mostrando que a rotina está atuando conforme o desejado. Nesta rotina, cabe ao médico a definição da rotação segura para o paciente.

Falha 3 - Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente

A rotina de manutenção desta falha prevê uma lógica de verificação do estado do paciente baseada na leitura dos sensores do DAV. Neste sentido, verifica-se a rotina é responsável por enviar comandos de verificação dos sensores e, em seguida, de alteração dos parâmetros utilizados no controle do dispositivo. Novamente, esta rotina não terá interação com o controlador local, mas para efeito de testes, simulou-se um coração com um batimento abaixo do desejado, sendo necessária a aceleração do DAV para suprir a necessidade de sangue do corpo. Este resultado está ilustrado na Figura 9.

É possível ver no gráfico o aumento da pressão, indicando que o DAV aumentou sua velocidade, mostrando que a rotina está atuando conforme o desejado. Nesta rotina, cabe ao médico a definição das parâmetros que os sensores avaliarão para a definição da velocidade que deve ser estabelecida.

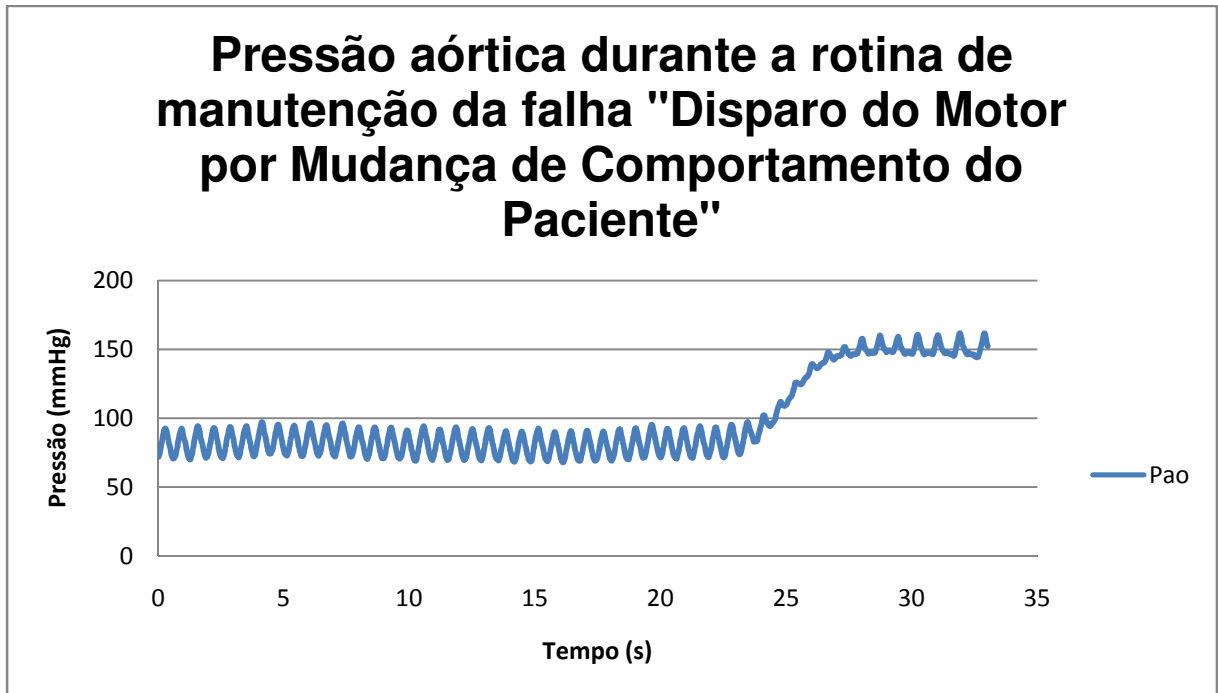


Figura 9 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Disparo do Motor por Mudança de Comportamento do Paciente".

Falha 4 - Desacoplamento Repentino do Motor

Para o desacoplamento do rotor, a rotina proposta consiste em parar este e acelerá-lo novamente. Caso o rotor reacople, a rotina é finalizada, caso contrário o procedimento pode ser repetido ou o pode-se ativar um estado de emergência no qual tenta-se manter o rotor num estado seguro de rotação. A Figura 10 apresenta o resultado obtido para um rotina que tentou reacoplar três vezes antes de indicar que o DAV estava em estado de emergência e colocá-lo numa velocidade de segurança.

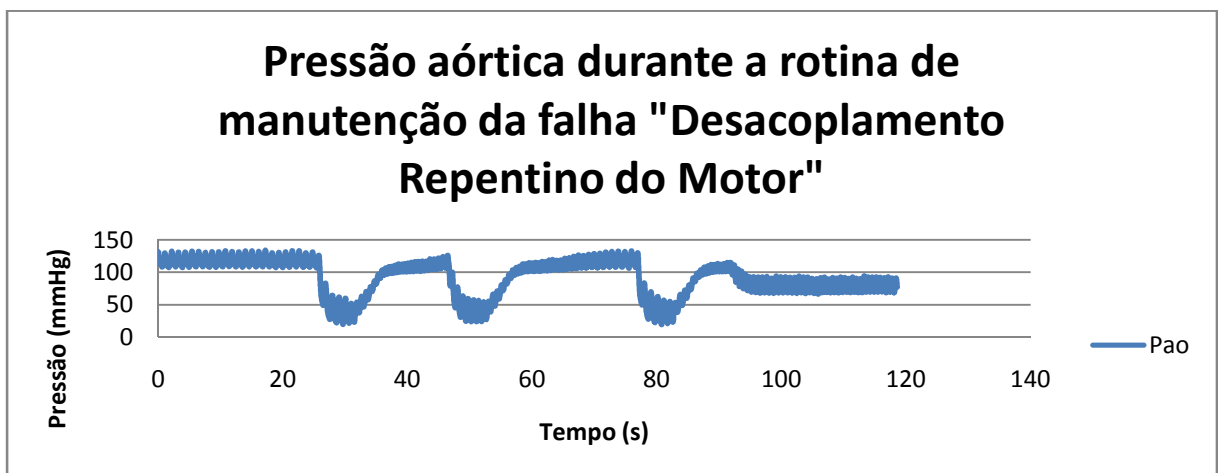


Figura 10 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Desacoplamento Repentino do Motor".

Nota-se, no gráfico do resultado, as três curvas que indicam o freio do motor e a aceleração deste, terminando a rotina numa velocidade mais baixa que a desejada, que é a velocidade de segurança. Este resultado apenas ilustra que o controlador está recebendo os comandos planejados da rotina, pois caso o rotor estivesse realmente desacoplado não seria possível ver as variações tão nitidamente. Nesta rotina, cabe ao médico definir o número de tentativas antes da rotina definir um estado de emergência e a velocidade de emergência para o paciente.

Falha 5 - Falha na Alimentação

A proposta de rotina para tratar esta falha é uma verificação da origem da falha na alimentação do DAV para definir se é necessária a cirurgia ou não. Dessa forma, esta rotina não alterará a velocidade da bomba e, tampouco, a pressão em qualquer ponto do sistema. Assim, para a verificação dos resultados do algoritmo de manutenção, utilizou-se a placa com LEDs e botões para simular as entradas e saídas da rotina, ilustrada na Figura 11.

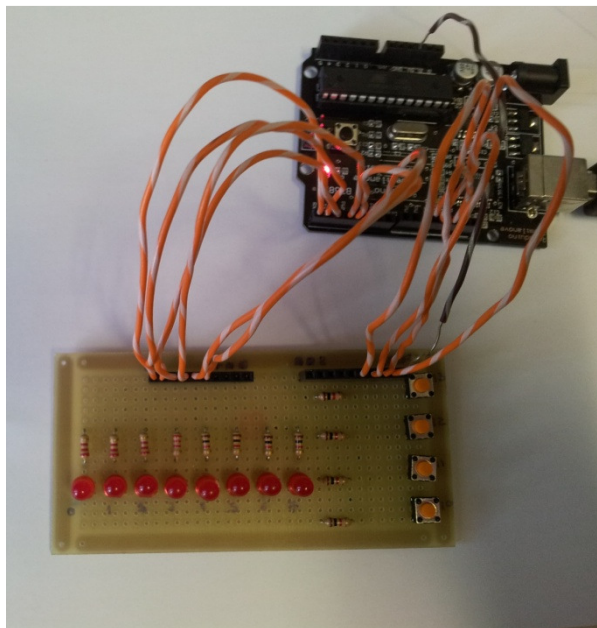


Figura 11 – Placa com LEDs e Botões para simular as saídas e entradas das rotinas de manutenção.

Configurou-se então as entradas IC1 e IC2 da rotina como os botões 1 e 2 da placa e as saídas OC1, OC2 e OC3 como os LEDs 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se observar o comportamento adequado da rotina, seguindo a lógica desejada para a mesma.

Falha 6 - Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico

Assim como a rotina anterior, a rotina para tratar esta falha não atua na velocidade do dispositivo, não havendo então variação de pressão que possibilite a avaliação da rotina. Nesta, é proposta uma verificação para encontrar a fonte do consumo inadequado. Novamente, utilizou-se de uma placa com LEDs e botões para a avaliação do funcionamento do algoritmo

De maneira semelhante a rotina anterior, configurou-se as entradas IC1 e IC2 da rotina como os botões 1 e 2 da placa e as saídas OC1, OC2 e OC3 como os LEDs 1, 2 e 3, respectivamente. Pode-se observar o comportamento adequado da rotina, seguindo a lógica desejada para a mesma.

Falha 7 - Motor Queimado

A rotina de manutenção para tratar esta falha apenas aciona alarmes para indicar para o sistema de controle supervisão e para o paciente a ocorrência desta falha para que o dispositivo seja trocado. Dado que a ocorrência desta falha impossibilita a atuação na bomba, novamente tem-se que a rotina não afetará a pressão no sistema e novamente recorreu-se a placa com LEDs e botões para a verificação do funcionamento do algoritmo.

Desta vez, configurou-se a entrada IC1 da rotina como o botão 1 da placa e as saídas OC1 e OC2 como os LEDs 1 e 2, respectivamente. Novamente, pode-se observar o comportamento adequado da rotina, seguindo a lógica desejada para a mesma.

Falha 8 - Controlador Supervisório não Atua

A rotina proposta para tratar esta falha tenta verificar qual parte do sistema de controle supervisório está em falha para possibilitar uma troca consciente deste. Assim existem algumas etapas de verificação nesta rotina, mas estas devem ser enviadas pelo sistema supervisório para o sistema de controle local, portanto novamente a avaliação desta rotina se baseou numa análise dos sinais de controle enviados por esta.

Configurou-se para esta verificação as entradas IC1, IC2 e IC3 da rotina como os botões 1, 2 e 3 da placa e as saídas OC1, OC2, OC3, OC4 e OC5 como os LEDs 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Desta forma, seguiu-se a lógica da Rede de Petri proposta, podendo observar o comportamento adequado da rotina, seguindo a lógica desejada para a mesma.

Falha 9 - Sem Corrente nos Sensores

Nesta rotina, a proposta de ação é a indicação de um estado de emergência para o sistema de controle supervisório e um alarme para o paciente. Assim, o sistema supervisório deve colocar o dispositivo em um estado seguro de funcionamento até o momento em que possa ser feita uma cirurgia para arrumar este. Assim, simulou-se a atuação desta rotina através da verificação do dispositivo sendo colocado em uma velocidade de segurança. A Figura 12 ilustra o resultado obtido.

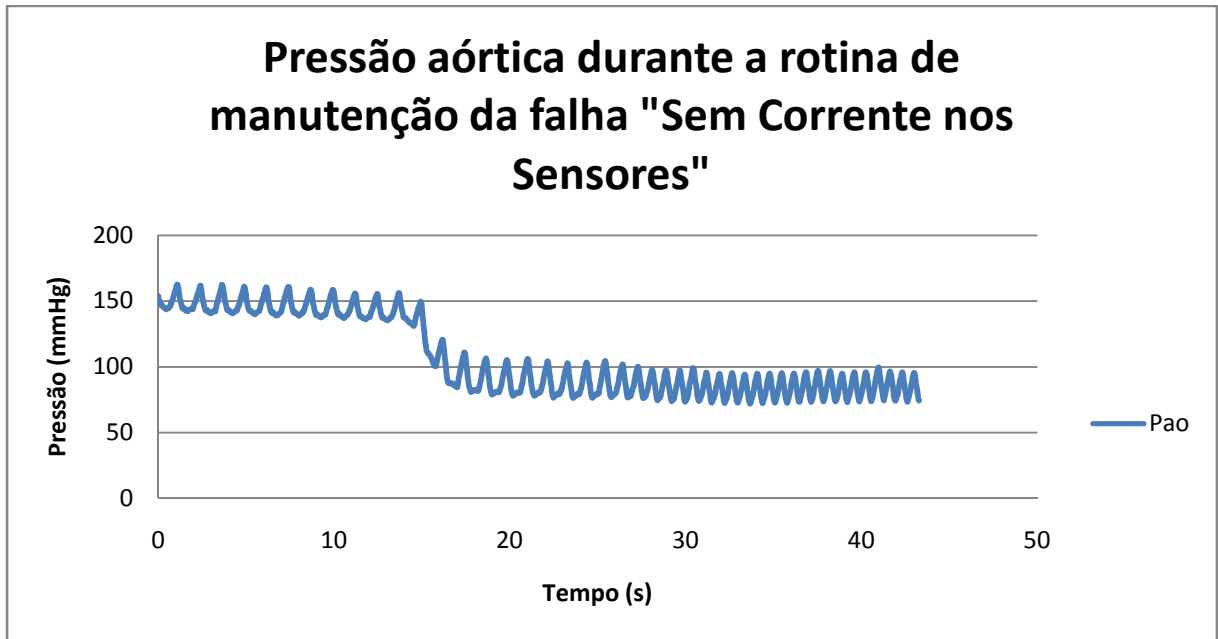


Figura 12– Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Sem Corrente nos Sensores".

Observa-se no gráfico o batimento cardíaco e uma diminuição na pressão arterial em determinado momento, que indica a desaceleração do rotor do DAV. Percebe-se, assim, que a rotina está se comportando da maneira desejada, cabendo a um médico a avaliação da velocidade de segurança para cada paciente.

Falha 10 - Desconexão das Cânulas

Esta rotina possui uma proposta muito semelhante a utilizada para tratar a falha 9, onde aciona-se um alarme para indicar que o sistema está em estado de emergência e um alarme para indicar a necessidade de cirurgia para corrigir a falha. Assim a rede de petri resultante é idêntica à da falha 9 e, portanto, os resultados obtidos são os mesmos que os apresentados na Figura 12. Todas as implicações apresentadas para a falha 9 também se aplicam para esta falha.

Falha 11 - Sensores Descalibrados

Esta é uma falha preventiva e seu disparo é dado por uma passagem de tempo ao invés da detecção da falha. Assim, a proposta de ação desta rotina de manutenção é ligar um alarme para indicar a chegada do momento de intervenção e

uma rotina de calibração. Ao indicar o momento de intervenção, o DAV deve ser colocado em um estado de operação seguro para garantir um funcionamento que não prejudique a saúde do paciente. A Figura 13 apresenta o resultado obtido para esta rotina.

Novamente, observa-se no gráfico o batimento cardíaco e uma diminuição na pressão arterial em determinado momento. Assim, percebe-se que a rotina está se comportando da maneira desejada, colocando o DAV numa rotação mais baixa, considerada segura. Para esta rotina, cabe a um médico a avaliação da velocidade de segurança para cada paciente e ao fabricante dos sensores a definição do melhor momento para a intervenção.

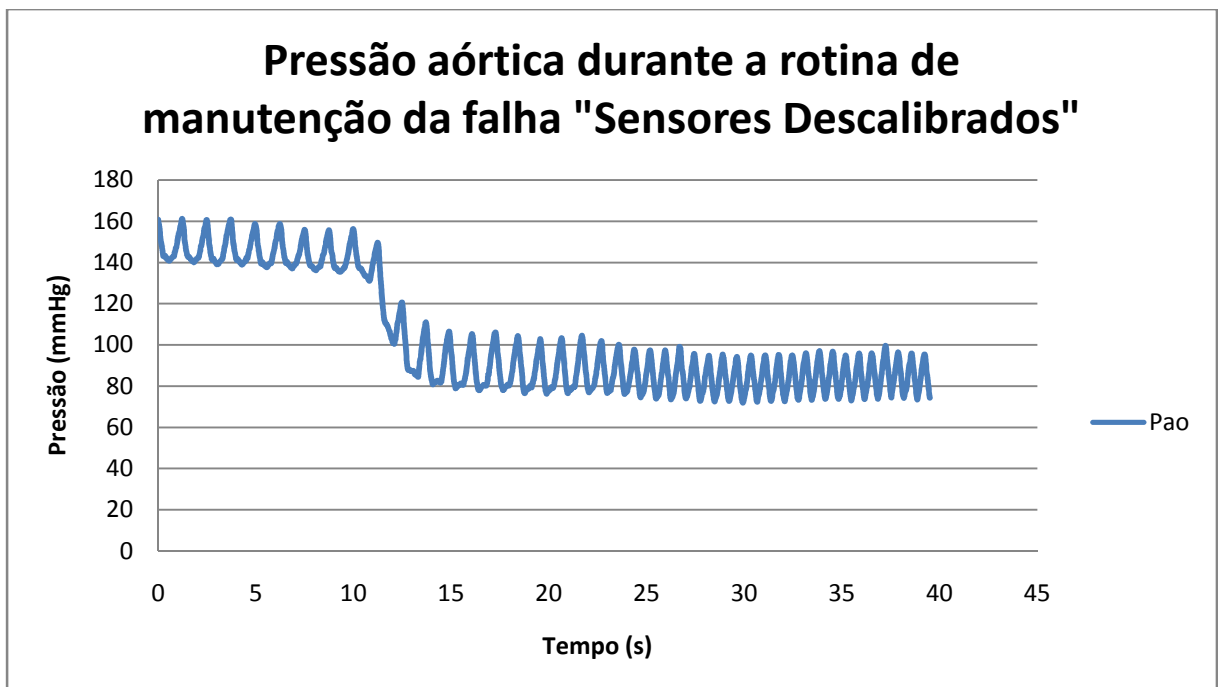


Figura 13 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Sensores Descalibrados".

Falha 12 - Disparo do Motor por Falha nos Sensores

A rotina proposta para tratar esta falha busca encontrar o ponto em falha no sistema. Assim, testa-se os sensores e o controlador para verificar se o dispositivo está atuando da forma desejada. Uma vez definida a parte em falha, a rotina indica para o sistema de controle supervisão colocar o DAV num estado seguro e aciona o alarme para o paciente ser encaminhado para cirurgia. A Figura 14 ilustra o resultado obtido para esta rotina.

Observa-se nesta figura que o DAV é de fato colocado numa velocidade mais baixa, caracterizada como segura, mostrando assim o funcionamento da rotina seguindo a lógica pensada. Novamente cabe ao médico a definição desta velocidade do estado seguro.

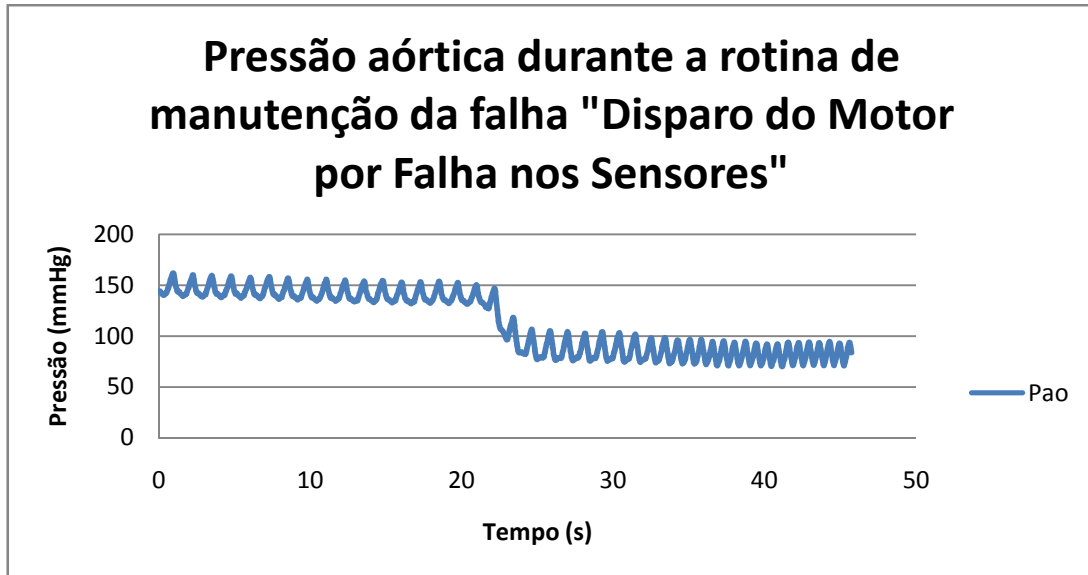


Figura 14 – Gráfico da pressão aórtica durante a rotina de manutenção da falha "Sensores Descalibrados".

Falha 13 - Baixa Rotação do DAV

A baixa rotação do dispositivo em estudo pode ser causado pelo desgaste resultado do uso deste. Assim, na rotina para tratar esta falha propõe-se uma verificação periódica do estado do rotor e do mancal do motor do DAV para avaliá-los. Caso for detectado que o rotor ou mancal, a rotina indica que está no momento de intervenção para a troca do dispositivo. Nesta rotina também não há uma variação na velocidade do DAV, sendo novamente utilizada a placa apresentada na Figura 11 para a verificação do funcionamento do algoritmo.

Configurou-se para esta verificação as entradas IC1, IC2 e IC3 da rotina como os botões 1, 2 e 3 da placa e as saídas OC1, OC2, OC3 e OC4 como os LEDs 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Foi possível assim seguir a lógica da Rede de Petri proposta, podendo observar o comportamento adequado da rotina conforme o desejado.

Falha 14 - Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético

O desalinhamento do rotor também é causado pelo desgaste originado pelo uso do dispositivo. Na rotina é proposta novamente uma verificação periódica do estado deste componente para inferir o momento correto de intervenção. Nesta rotina não há uma variação na velocidade do DAV novamente, sendo utilizada a placa apresentada na Figura 11 para a verificação do funcionamento do algoritmo.

Neste caso, configurou-se para esta verificação as entradas IC1 e IC2 da rotina como os botões 1 e 2 da placa e as saídas OC1 e OC2 como os LEDs 1 e 2, respectivamente. Notou-se então o funcionamento adequado do algoritmo conforme a lógica proposta na rotina.

Falha 15 - Fim da Bateria

O fim da bateria é uma falha cuja predição se tornou bastante popular nos dispositivos eletrônicos de hoje em dia. Ao ser disparada a rotina verifica a carga na bateria e informa o usuário se sua troca ou carregamento é necessária. Desta forma, a rotina não atua sobre a velocidade do dispositivo e a placa da Figura 52 foi novamente utilizada para verificar o algoritmo gerado.

Para esta rotina, configurou-se para esta verificação as entradas IC1 e IC2 da rotina como os botões 1 e 2 da placa e as saídas OC1 e OC2 como os LEDs 1 e 2, respectivamente. Através do disparo da rotina, avaliou-se sua lógica e suas ações, verificando que estas estavam condizentes com as propostas.

CONCLUSÃO

A caracterização dos possíveis modos de falha de um DAV possibilitou uma rápida avaliação das melhores políticas de manutenção aplicáveis para cada um destes modos. Com base na política de manutenção definida, podemos determinar as ações de manutenção para cada falha de maneira objetiva e clara.

As RdPs de alto nível se mostram uma forte ferramenta para a modelagem de procedimentos de manutenção, pois possibilita uma descrição em alto nível do sistema e um refinamento em níveis de detalhamento de uma maneira sistemática. Neste contexto há duas contribuições efetivas a partir da aplicação desta abordagem: (i) por tratar-se de um modelo gráfico que aceita linguagem natural é ideal como ferramenta para integrar equipes multidisciplinares facilitando o entendimento sem perder a descrição formal e semântica dos processos e; (ii) com a utilização de RdPs, pode-se realizar a automatização de processos de manutenção, quando cabível, por meio do uso de metodologias para obtenção de modelos de controle em redes interpretadas. Ressalta-se que todas as redes interpretadas desenvolvidas eram redes vivas e com todos os seus estados alcançáveis, mostrando a validade da metodologia de refinamento adotada.

Observa-se, também, que a metodologia utilizada para a transcrição dos modelos em RdP para programas de controle garante a documentação de aspectos semânticos que são perdidos quando é gerado um programa de controle em linguagem de baixo nível. Desta forma, a manutenção do código torna-se viável.

Por fim, os testes realizados com o simulador para DAVs do Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia e com a placa de LEDs e botões possibilitou a verificação do funcionamento do algoritmo final levantado e a validação deste. Enfatiza-se que muitos dos parâmetros utilizados nos algoritmos devem ser definidos por equipes médicas que devem levar em conta o quadro de saúde de cada paciente.

Portanto, este trabalho introduz uma proposta de modelo de manutenção para DAVs considerando diferentes políticas de manutenção a fim de avaliar o sistema em sua totalidade. Ressalta-se que a grande quantidade de falhas que podem ser tratadas apenas por manutenção corretiva se dá pelo fato do sistema ainda estar em desenvolvimento e parte deste ser composta por um sistema biológico, introduzindo

diversos aspectos aleatórios ao sistema. Mas, tem-se que, para sistemas onde desconhecemos os parâmetros vitais e seus modos de falha, a manutenção corretiva possibilita realizar um estudo destas características para se aprimorar continuamente a política de manutenção utilizada. Desta forma, existe a possibilidade de aprimorar o modelo inicialmente proposto a partir de dados obtidos do sistema em funcionamento em pacientes portadores de DAV, algo que pode-se fazer devido às técnicas utilizadas na metodologia, que são bem estruturadas para serem capazes de absorver variações no sistema e a atualização de todo o processo realizado.

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, A .J. P. Characteristics of a Blood Pump Combining the Centrifugal and Axial Pumping Principles: The Spiral Pump. *Artificial Organs*, USA, v. 20, n. 6, p. 605-612, 1996.

ANDRADE, A. J. P. et al. Auxiliary total artificial heart: A compact electromechanical artificial heart working simultaneously with the natural heart. *Artificial Organs*, USA , v. 23, p. 876-880, 1999.

ANTAKI, J.F.; BOSTON, J.R.; SIMAAN, M.A. Control of heart assist devices, *Decision and Control. Proceedings. 42nd IEEE Conference on* , vol.4, no., pp. 4084- 4089 vol.4, 9-12 Dec. 2003.

BOCK, E. G. P. et al. A new concept of centrifugal blood pump using pivot bearing system: the conversion of the spiral pump inlet port. *ASAIO Journal* , v. 1, p. 1-2, 2005.

BOCK, E. G. P. et al. New Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Wear Evaluation in Bearing System, Performance Tests, and Preliminary Hemolysis Tests. *Artificial Organs* , v. 32, p. 329-333, 2008.

BOCK, E. G. P. . Projeto, Construção e Testes de um Dispositivo de Assistência Ventricular: Bomba de Sangue Centrífuga Implantável; Tese de Doutorado; Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas; Campinas, SP, 2010.

BOCK, E. G. P. et al . Implantable Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Electromechanical Actuator, Prototyping, and Anatomical Studies. *Artificial Organs*, v. 35, p. 437-442, 2011.

BOCK, E. G. P. et al. Implantable Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Electromechanical Actuator, Prototyping, and Anatomical Studies. *Artificial Organs*, v. 35, p. 437-442, 2011.

CARDOSO, I. A. P. . Desenvolvimento de método para seleção de políticas de manutenção baseado em análise de risco; Tese de Doutorado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo, SP, 2004.

CAVALHEIRO, A. C. M., SANTOS FILHO, D.J., et alli, Controle Supervisório para Gerenciamento e Diagnose de um Dispositivo de Assistência Ventricular, In: 6º Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2010.

CAVALHEIRO, A. C. M. et al. Design, Analysis and Validation of Supervisory Control System for Ventricular Assist Device. In: COBEM'2011 21st International Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal. Proceedings of COBEM'2011. Rio de Janeiro, RJ : ABCM, 2011.

CAVALHEIRO, A. C. M. et al. Analysis and Tests of Supervisory Control Systems Applied to a Ventricle Assist Device. *ASAIO Journal* (1992), v. 57, p. 119-119, 2011.

CAVALHEIRO, A. C. M. et al. Design of Supervisory Control System for Ventricular Assist Device. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, v. 347, p. 375-382, 2011.

CEN, European Committee for Standardization, Maintenance Terminology. European Standard, Brussels. EN 13306:2001.

DINKHUYSEN, J. J. et al. Bomba sangüínea espiral: concepção, desenvolvimento e aplicação clínica de projeto original. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular*, v. 22, p. 224-234, 2007.

GALANTIER, J. Avaliação do emprego clínico do dispositivo de assistência ventricular InCor como ponte para o transplante cardíaco. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 2007.

GRIFFITH, B.P. et al, HeartMate II left ventricular assist system: from concept to first clinical use, *The Annals of Thoracic Surgery*, p. 116-120, 2001. Disponível em http://ats.ctsnetjournals.org/cgi/content/full/71/3_suppl/S116

FONSECA, J. et al. Hybrid Cardiovascular simulator performance evaluation. In 7 Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2011.

FREY, G. SIPN, Hierarchical SIPN and Extensions. Kaiserslautern: Institute of Automatic Control - University of Kaiserslautern, 2001.

IEC, International Eletrotechnical Commission, HAZOP Studies-Application Guide, British Standard, BSIEC 61882:2001.

JENSEN, K.; KRISTENSEN, L.. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems, Springer Verlag, 2009.

KELLY, A. Strategic Maintenance Planning, Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann, 2006.

MATUSHESKI, R.. The Role of Information Technology in Plant Reliability; P/PM Technology, June, 1999.

MIYAGI, P. E. . Controle Programável, Terceira Reimpressão. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

MELLO, A. T. F. . A Transcription Tool from Petri Net to CLP Programming Languages, COBEM 2011.

MURATA, T. Petri Nets: properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE* 77(4):541-580, 1989.

NBR 5462, Normas Brasileiras para Confiabilidade e Manutenibilidade, 1994.EFNMS

NEPOMUCENO, L. X.; Técnicas de Manutenção Preditiva. Volume 1. São Paulo: Edgar Blucher, 1999

NOSÉ, Y.; MOTOMURA, T. Cardiac Prosthesis – Artificial Heart and Assist Circulation. Houston: ICMT Press, 2003, ed.4, 238p.

NOVELLO, W., ARRUDA, A.C. “In Vitro” evaluation of open heart surgery tubing coated with heparin and lipid. Artificial Organs, v.24, n.3, p.182-184, 2000.

PACHLER, C. Diagnóstico e tratamento de falhas aplicados aosistema de controle de um DAV. Relatório final de pesquisa de iniciação científica Processo FAPESP – 2010/20398-0. 2011.

REISIG, W. Petri Nets: an Introduction, Spring Verlag, 1981.

REISIG, W. Petri Nets: a Primer, Spring Verlag, 1992.

ROZEMBERG, G. Lecture Notes in Computer Science, 1491, Advances in Petri Nets, Springer Verlag, 1998.

YI, W., Physiological Control of Rotary Left Ventricular Assist Device. Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, Zhangjiajie, Hunan, China, p. 469-474, 2007.

APÊNDICE A – REDES DE PETRI

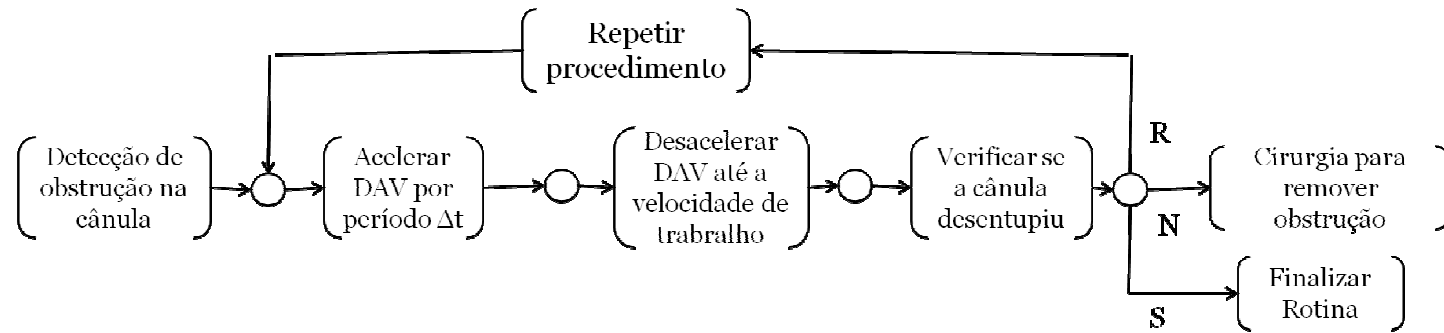


Figura 15 - Tratamento da falha "Obstrução na Cânula".

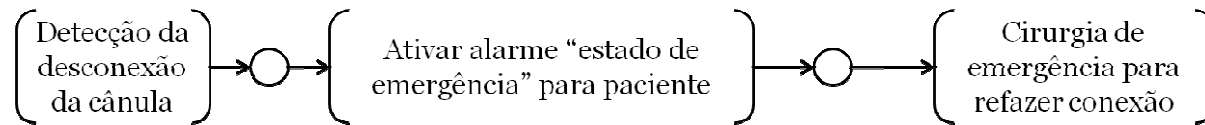


Figura 16 - Tratamento da falha "Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios".

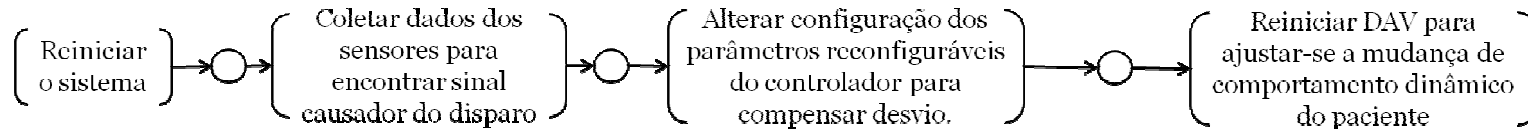


Figura 17 - Tratamento da falha "Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente".

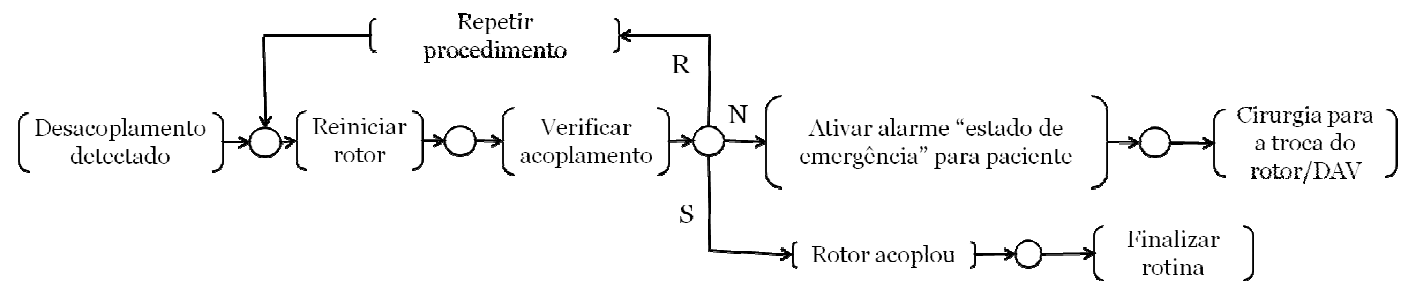


Figura 18 - Tratamento da falha "Desacoplamento Repentino do Motor".

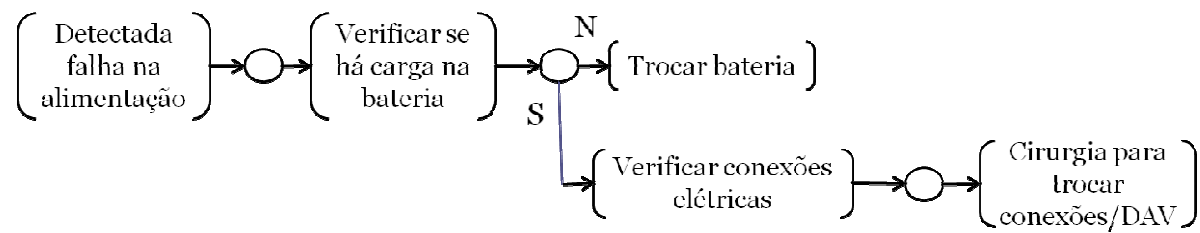


Figura 19 - Tratamento da falha "Falha na Alimentação".

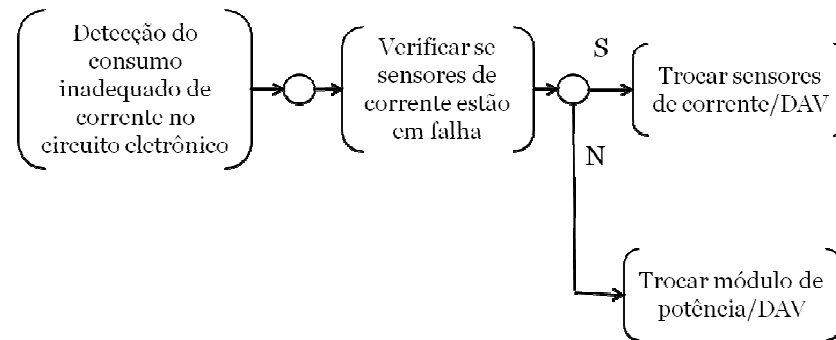


Figura 20 - Tratamento da falha "Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico".

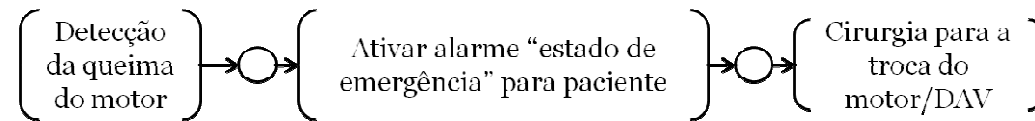


Figura 21 - Tratamento da falha "Queima do Motor".

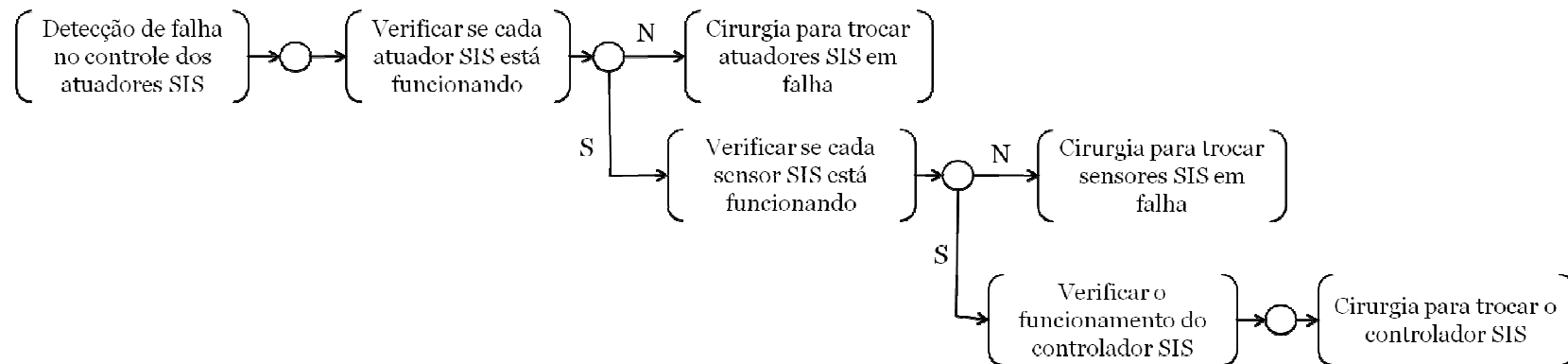


Figura 22 - Tratamento da falha "Controle Supervisório não Atua".

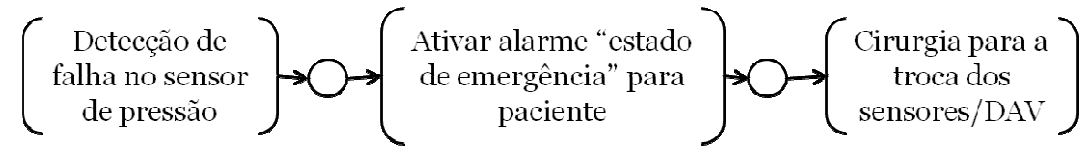


Figura 23 - Tratamento da falha “Sem Corrente nos Sensores”.

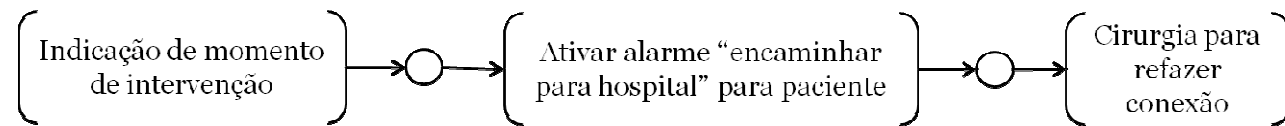


Figura 24 - Tratamento da falha “Desconexão da Cânula”.

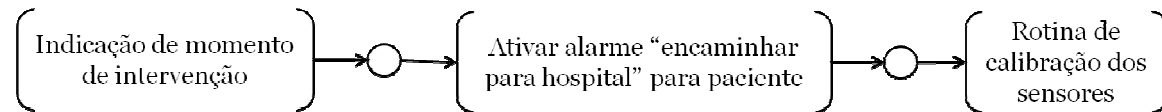


Figura 25 - Tratamento da falha “Sensores Descalibrados”.

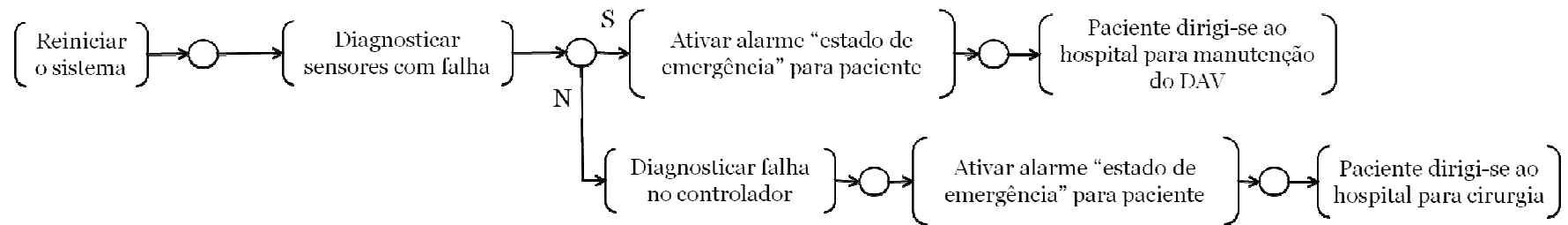


Figura 26 - Tratamento da falha "Disparo do Motor por Falha nos Sensores".

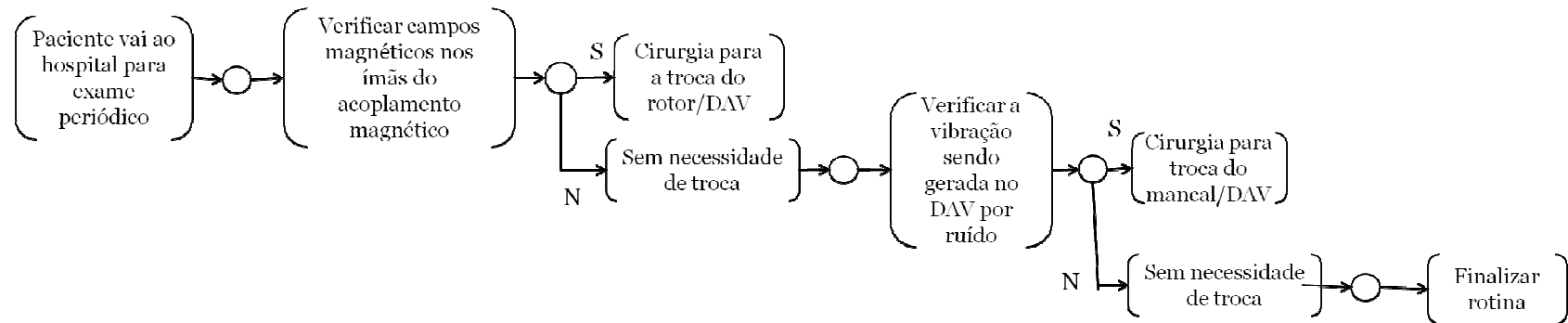


Figura 27 - Tratamento da falha "Baixa Rotação do DAV".



Figura 28 - Tratamento da falha "Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético".

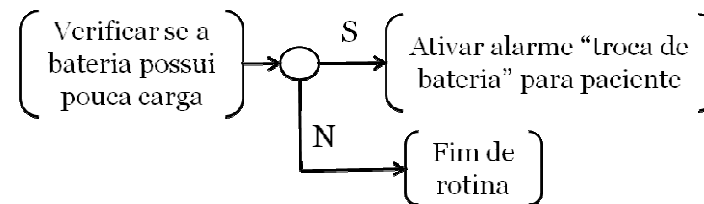


Figura 29 - Tratamento da falha "Baixa Rotação do DAV".

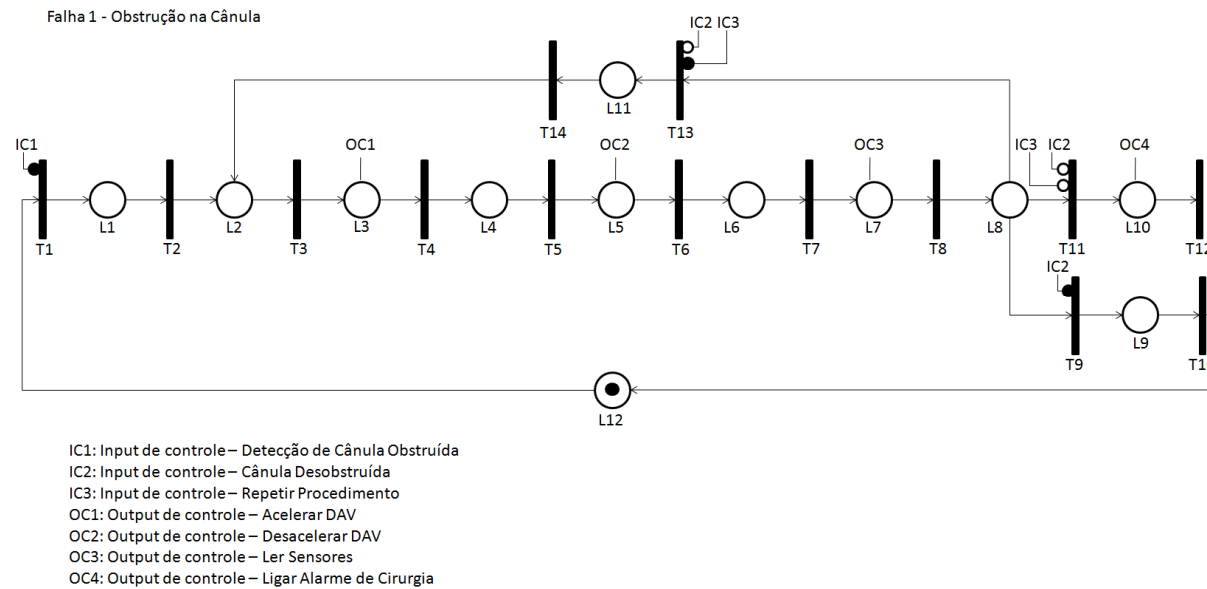


Figura 30 - Rede de Petri Interpretada da falha “Obstrução na Cânula”.

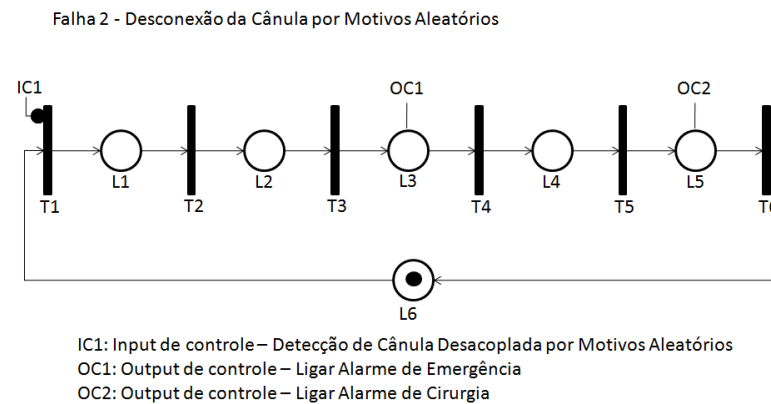
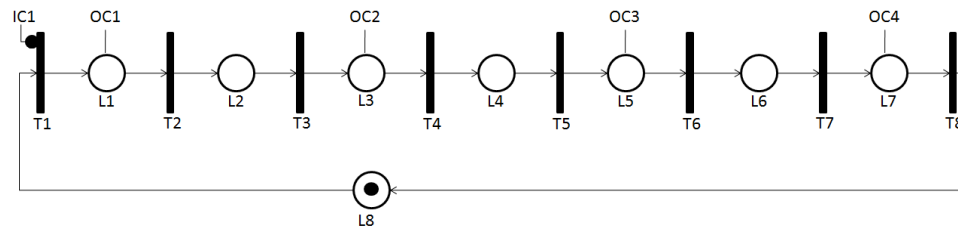


Figura 31 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios”.

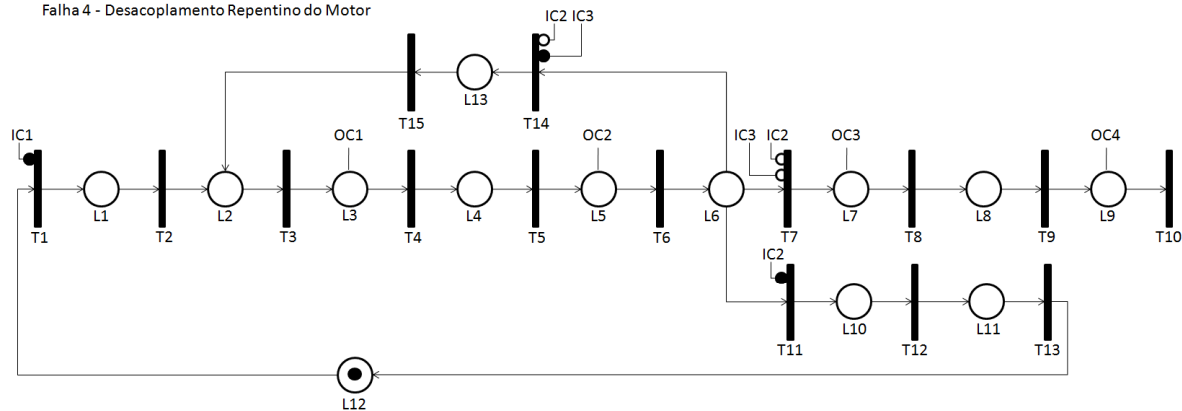
Falha 3 - Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente



IC1: Input de controle – Detecção de Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente
 OC1: Output de controle – Reiniciar DAV
 OC2: Output de controle – Ler Sensores
 OC3: Output de controle – Alterar Configurações do DAV
 OC4: Output de controle – Reiniciar DAV

Figura 32 - Rede de Petri Interpretada da falha “Disparo do Motor por Mudança do Comportamento do Paciente”.

Falha 4 - Desacoplamento Repentino do Motor



IC1: Input de controle – Detecção de Desacoplamento Repentino do Motor
 IC2: Input de controle – Rotor Acoplado
 IC3: Input de controle – Repetir Procedimento
 OC1: Output de controle – Reiniciar Motor
 OC2: Output de controle – Ler Sensores
 OC3: Output de controle – Ligar Alarme de Emergência
 OC4: Output de controle – Ligar Alarme de Cirurgia

Figura 33 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desacoplamento Repentino do Motor”.

Figura 34 - Rede de Petri Interpretada da falha “Falha na Alimentação”.

Figura 35 - Rede de Petri Interpretada da falha “Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico”.

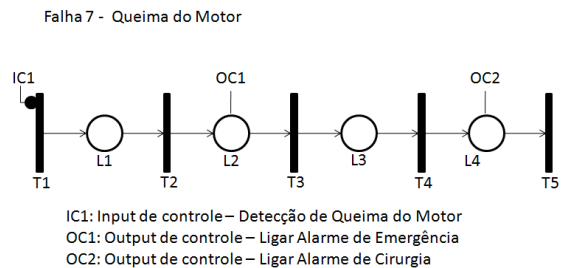


Figura 36 - Rede de Petri Interpretada da falha “Queima do Motor”.

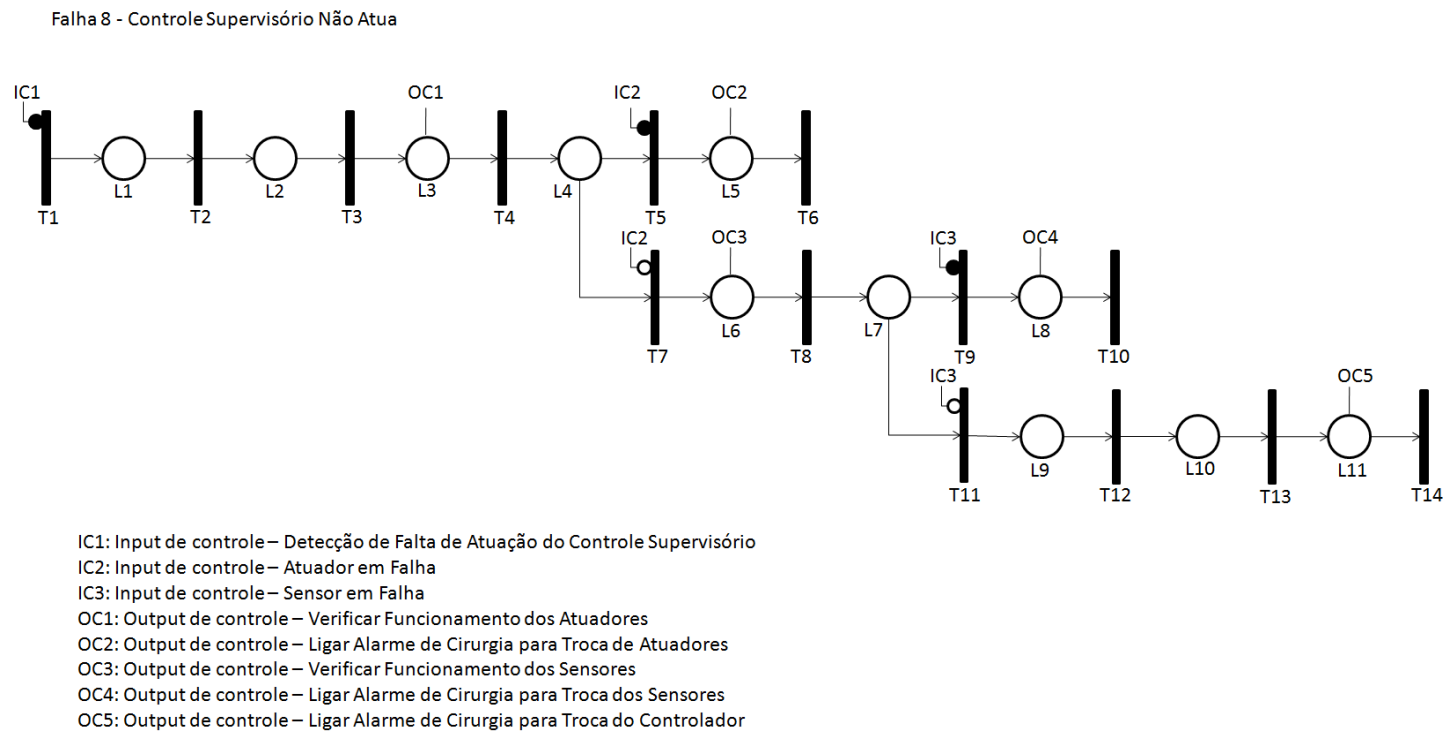


Figura 37 - Rede de Petri Interpretada da falha “Controle Supervisório não Atua”.

Falha 9 - Sem Corrente nos Sensores

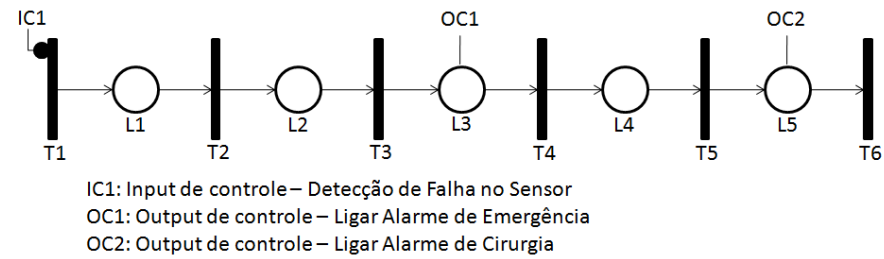


Figura 38 - Rede de Petri Interpretada da falha “Sem Corrente nos Sensores”.

Falha 10 - Desconexão da Cânula

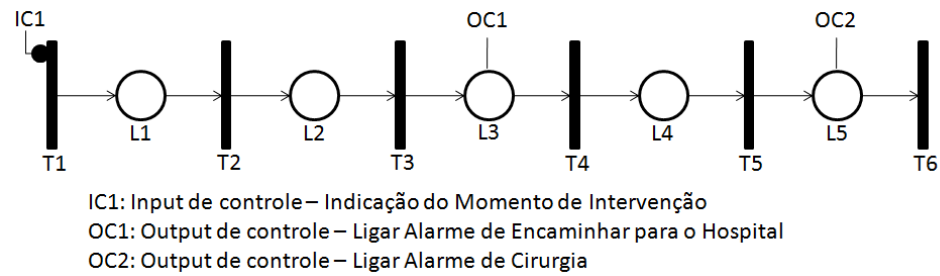


Figura 39 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desconexão da Cânula”.

Falha 11 - Sensores Descalibrados

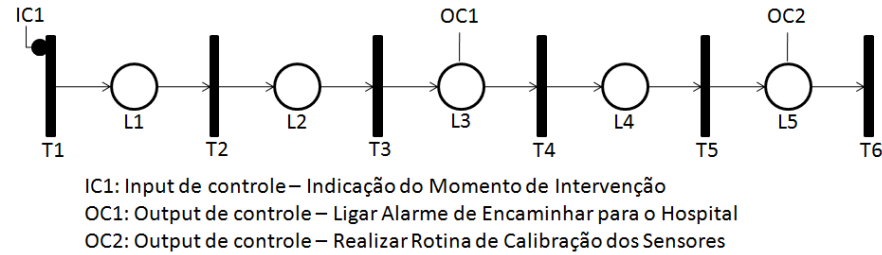


Figura 40 - Rede de Petri Interpretada da falha “Sensores Descalibrados”.

Falha 12 - Disparo do Motor por Falha nos Sensores

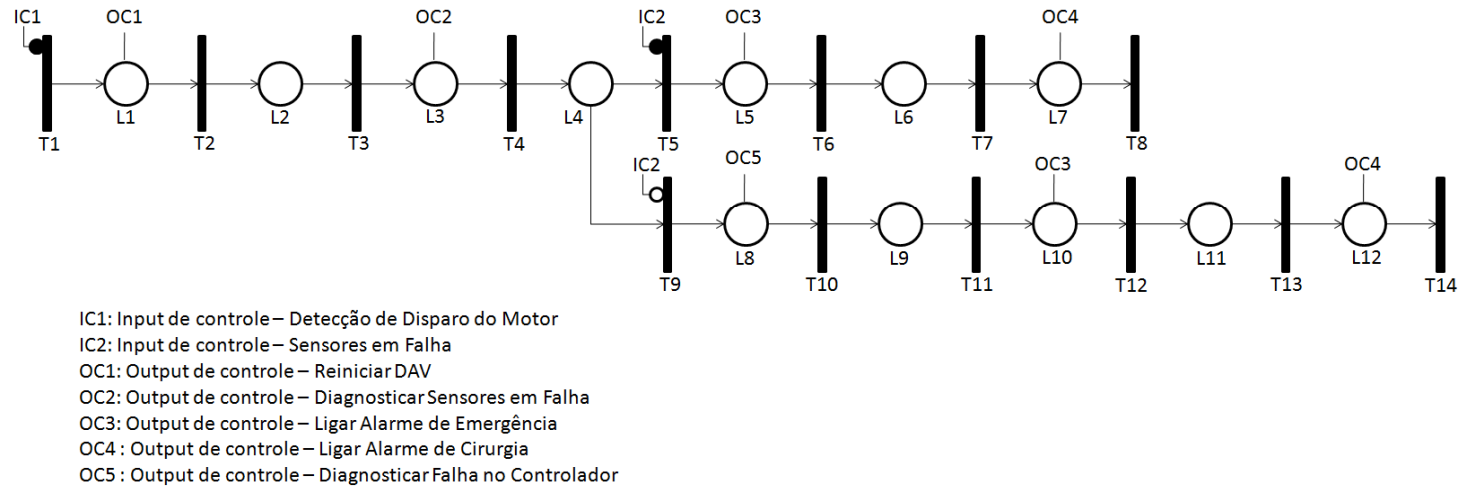
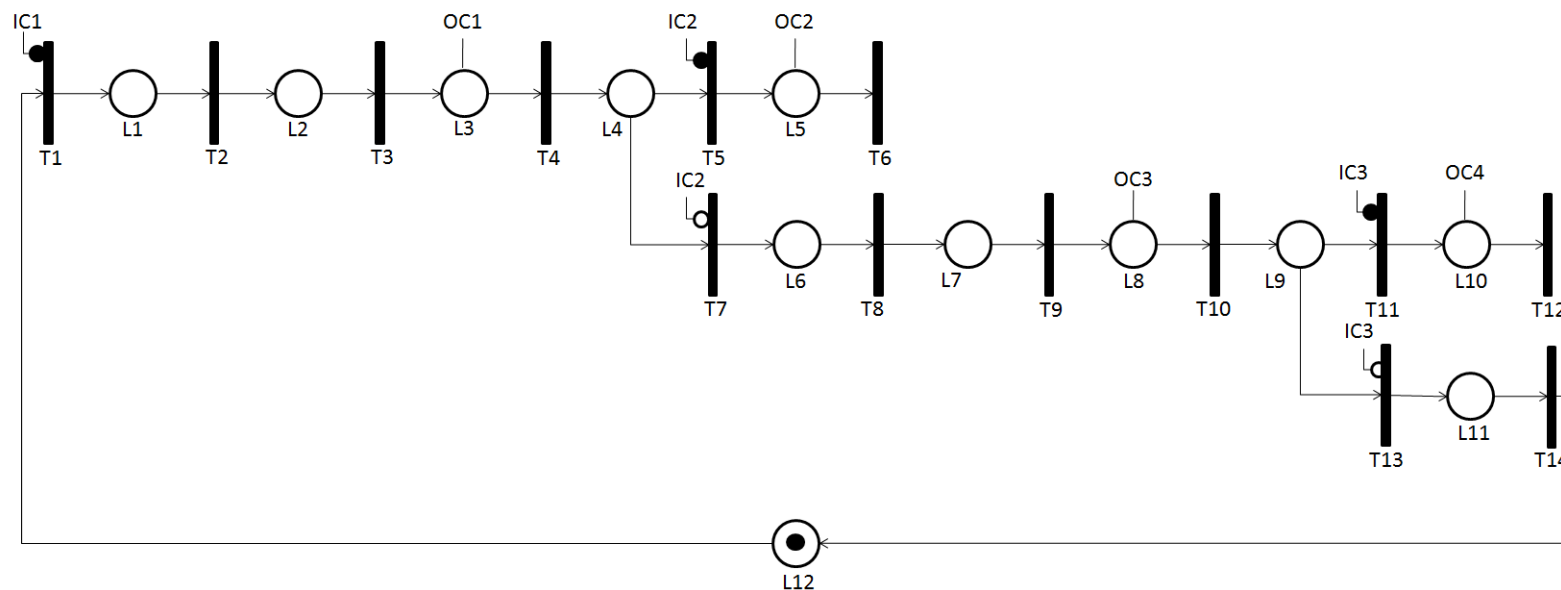


Figura 41 - Rede de Petri Interpretada da falha “Disparo do Motor por Falha nos Sensores”.

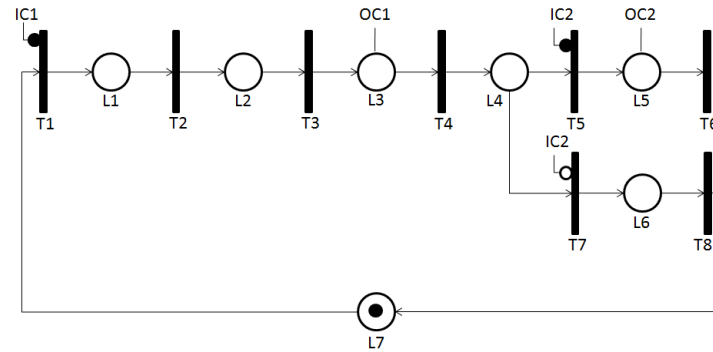
Falha 13 - Baixa Rotação do DAV



IC1: Input de controle – Exame Periódico
 IC2: Input de controle – Campo Magnético do Acoplamento em Falha
 IC3: Input de controle – Vibração no DAV por Ruído
 OC1: Output de controle – Verificar Campo Magnético do Acoplamento
 OC2: Output de controle – Ligar Alarme de Cirurgia para Troca do Rotor
 OC3: Output de controle – Verificar Vibração no DAV por Ruído
 OC4: Output de controle – Ligar Alarme de Cirurgia para Troca do Mancal

Figura 42 - Rede de Petri Interpretada da falha “Baixa Rotação do DAV”.

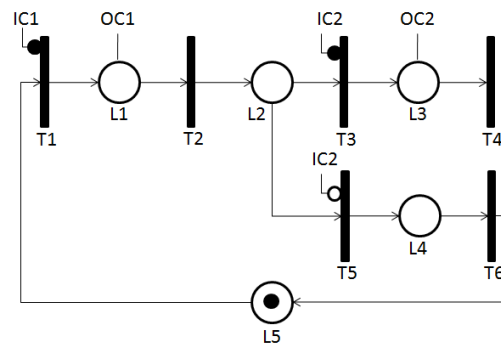
Falha 14 - Desalinhamento do Rotor Causando Desalinhamento Magnético



IC1: Input de controle – Exame Periódico
 IC2: Input de controle – Campo Magnético do Acoplamento em Falha
 OC1: Output de controle – Verificar Campo Magnético do Acoplamento
 OC2: Output de controle – Ligar Alarme de Cirurgia para Troca do Rotor

Figura 43 - Rede de Petri Interpretada da falha “Desalinhamento do Rotor Causando Desacoplamento Magnético”.

Falha 15 - Fim da Bateria



IC1: Input de controle – Indicação do Momento de Verificação
 IC2: Input de controle – Bateria com Pouca Carga
 OC1: Output de controle – Verificar Carga da Bateria
 OC2: Output de controle – Ligar Alarme de Troca de Bateria

Figura 44 - Rede de Petri Interpretada da falha “Baixa Rotação do DAV”.

APÊNDICE B – DIAGRAMAS LADDER

O diagrama Ladder é uma linguagem de programação regulamentada pela IEC 1133-3 e que se originou do circuito de relés. Ele é uma das ferramentas mais populares na área de controle de SED e permite uma representação detalhada com livre escolha de conexões para a representação e utilização conjuntas de vários tipos de relés (MIYAGI, 1997).

O diagrama Ladder possui três elementos básicos:

- Contato: podem ser do tipo normalmente aberto (NA), normalmente fechado (NF), e contato detector de variação. A cada contato é associada uma entrada, saída ou variável lógica de memória. Quando uma bobina “x” é acionada, o contato “x” associado é imediatamente acionado;
- Bobina: podem ser do tipo comum, inversa, de set (ou reset), de memória, e detectora de variação. Às bobinas são atribuídas variáveis lógicas, e seus processamento e atuação se dão de cima para baixo com a mudança de estado de forma instantânea;
- Temporizador: podem ser do tipo On-Delay, Off-Delay, e Pulse. Cada temporizador possui: entrada, saída, set-point e valor atual.

No diagrama Ladder, as duas linhas verticais são chamadas de ‘linha mãe’, e ligando-as estão as linha horizontais (*rung*) do Ladder. As bobinas devem sempre ocupar a última coluna à direita no *rung* enquanto que os contatos ficam à esquerda.

Assim, utilizando estes elementos é possível criar funções básicas de controle tais como:

- Operações lógicas: AND, OR e outros são facilmente representados posicionando contatos adequadamente no mesmo *rung*;
- Memorização: em sistemas dinâmicos, as saídas podem depender das variáveis de entrada atuais e anteriores. Através de contatos e bobinas é possível armazenar uma entrada mesmo após a mudança de seu valor.
- Temporização: vários tipos de temporizadores podem ser implementados.

A execução do diagrama Ladder ocorre através de processamento iterativo (pois não considera todos os estados simultaneamente), ao invés do processamento paralelo que ocorre no diagrama de relés original, e existe uma ordem de processamento: de cima para baixo. Isto possibilita que o projeto do diagrama seja desenvolvido explorando-se a ordem do processamento.

No diagrama Ladder a energia flui apenas da esquerda para a direita de forma a garantir a operação lógica descrita, enquanto que no diagrama de relés o fluxo da corrente pode ser bidirecional no *rung*.

O intervalo de tempo entre duas execuções do diagrama Ladder é chamado de *Scan Cycle*, e é possível ter duas condições de execução:

- Scan cycle fixo: o diagrama Ladder é executado uma vez e, caso o *scan cycle* não tenha sido atingido, o sistema permanece ocioso;
- Scan cycle variável: o diagrama Ladder é executado ininterruptamente, de forma que o *scan cycle* não pode ser garantido, pois depende da carga de processamento gerada por cada execução do Ladder.

Diagrama Ladder da falha “Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios”

```
C:\Users\Vincent Goncalves\Desktop\Dropbox\Polígrafo\SemestreTrabalho Final\Simulação - LDR00022.txt
LDRmicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 21:56

LADDER DIAGRAM:

Diagrama Ladder da falha “Disparo do Motor por Mudança de Comportamento do Paciente”

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 21:57

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Pol 101\Semestre Trabalho Final\Simulacão - LDMicro24.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

```

11
11 ; Etapa 1 - Habilitacao das Transicoes

```




```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Poli101\Semestre Trabalho Final\Simulacão - LDMicro2.5.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

Timing diagram for the 8086 microprocessor showing the relationship between clock (H), address (A), data (D), and status (S) signals. The diagram shows a sequence of operations: RD (Read), WR (Write), and RD (Read). Each operation is represented by a horizontal bar with a label (RD or WR) and a duration. The signals are shown as digital waveforms. The clock (H) is a periodic square wave. The address (A) is a bus that carries the address of the memory location being accessed. The data (D) is a bus that carries the data being read or written. The status (S) is a bus that carries the status of the operation. The diagram shows that the address is valid during the RD and WR operations, and the data is valid during the RD and WR operations. The status is valid during the RD and WR operations.

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 21:58

```

| |                                     | |
| |         RD5                         SOC3      | |
22 |-----[ ]-----|-----[ ]-----| |
| |                                         | |
| |                                         | |
| | : Stage 4 - Inicializacao das Variaveis    | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
24 |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |                                         | |
| |-----[END]-----| |
| |                                         | |

```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Poli101\Semestre Trabalho Final\Simulacão - LDMicro2.7.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Poli IV Semestre\Trabalho Final\Simulação - LDMicro2.7.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 21:59

LADDER DIAGRAM:

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Polí 10 1 Semestre\Trabalho Final\Simulacão - LDMicro 28.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Polígrafo SemestreTrabalho Final\Simulação - LDMicro2.5.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\PC\11º Semestre\Trabalho Final\Simulação - LDMicro2.9.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 22:00

LADDER DIAGRAM:

```

19  || Neste nao ha, pois a RdP nao eh reinicializavel.      ||
    ||                                                         ||
    ||                                                         ||
    ||-----[END]-----||
    ||                                                         ||
    ||                                                         ||
    ||                                                         ||

```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Polifil\SemestreTrabalho Final\Simulação - LDMicro2\LD2a1
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\PC\11º Semestre\Trabalho Final\Simulação - LDMicro 2.12.txt
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 22:01

LADDER DIAGRAM:

-1-


```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Polígrafo\SemestreTrabalho Final\Simulação - LDMicro2.132a
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Polítopo Semestre Trabalho Final\Simulação - LDmicro\2.11\src
LDmicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 22:01

LADDER DIAGRAM:



Diagrama Ladder da falha “Desalinhamento do Rotor Causando Desalinhamento Magnético”

quinta-feira, 8 de novembro de 2012 22:01

	11
	11
-----	11
	11
	11
	11
	11
	11
	11
	11
	11
	11
	11
-----	11
	11
	11
-----	11
	11
	11

```
C:\Users\Vincent Donato\Desktop\Dropbox\Pot1101 5 semestre\Trabalho Final\Simulação - LDMicro\2.15212
LDMicro export text
for 'ANSI C Code', 4.000000 MHz crystal, 10.0 ns cycle time
```

APÊNDICE C – GRAFOS DE ALCANÇABILIDADE

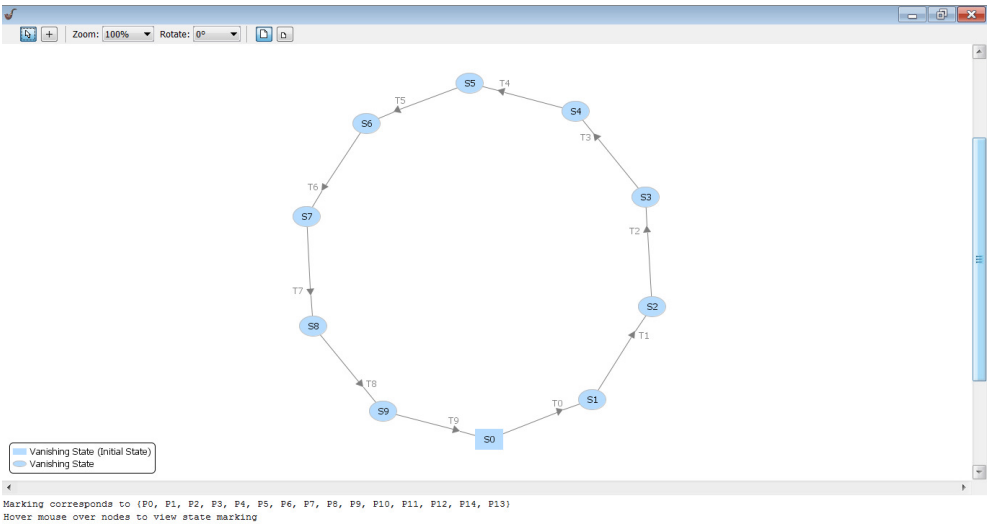


Figura 45 – Grafo de alcançabilidade da falha “Obstrução na Cânula”.

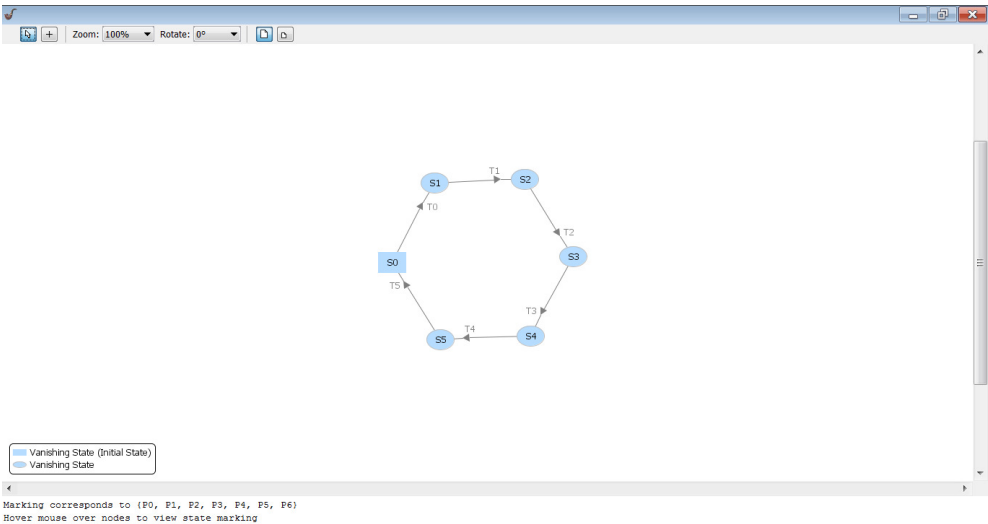


Figura 46 – Grafo de alcançabilidade da falha “Desconexão da Cânula por Motivos Aleatórios”.

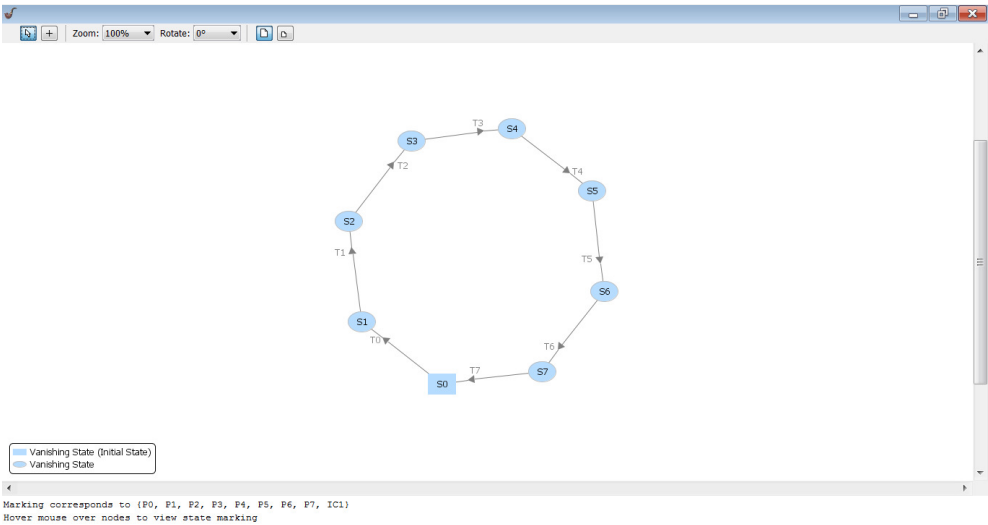


Figura 47 – Grafo de alcançabilidade da falha “Disparo do Motor por Mudança de Comportamento do Paciente”.

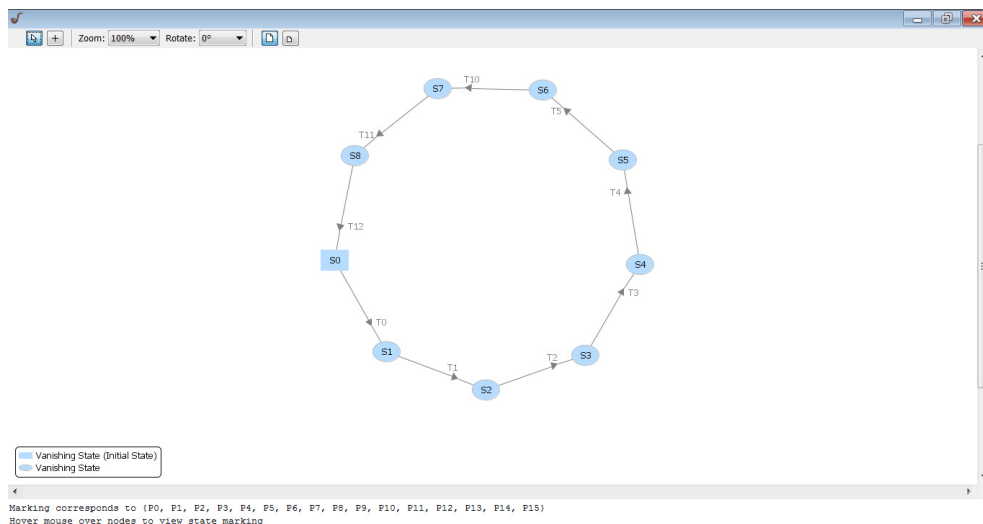


Figura 48 – Grafo de alcançabilidade da falha “Desacoplamento Repentino do Motor”.

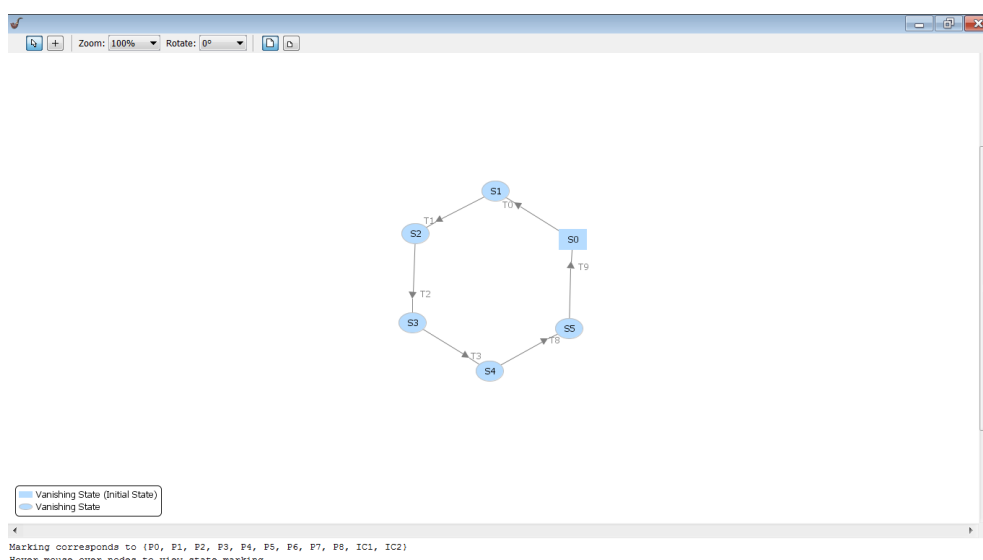


Figura 49 – Grafo de alcançabilidade da falha “Falha na Alimentação”.

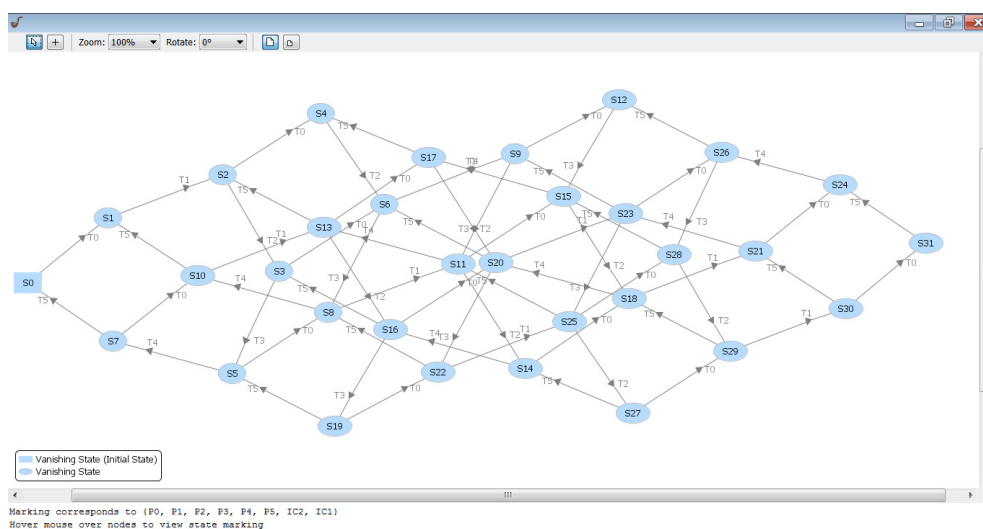


Figura 50 – Grafo de alcançabilidade da falha “Consumo Inadequado de Corrente pelo Circuito Eletrônico”.

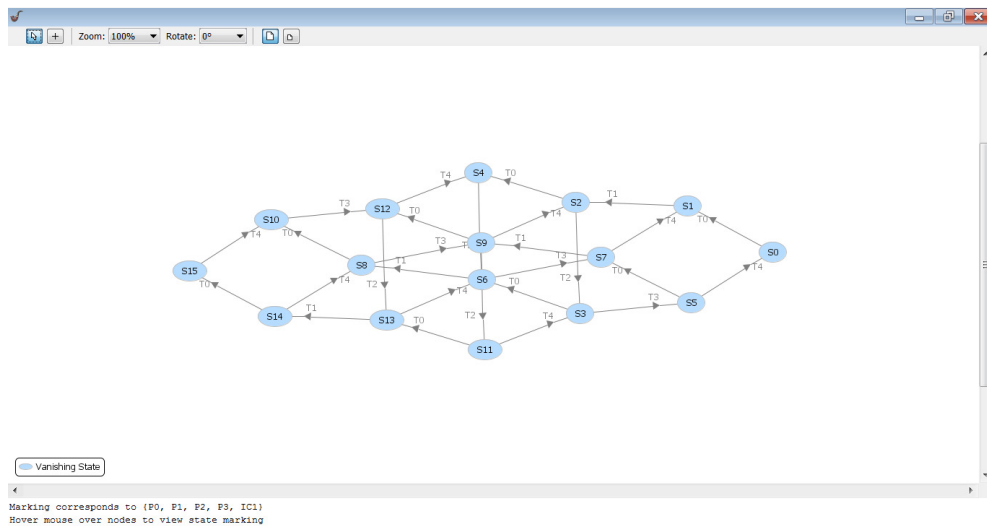


Figura 51 – Grafo de alcançabilidade da falha “Queima do Motor”.

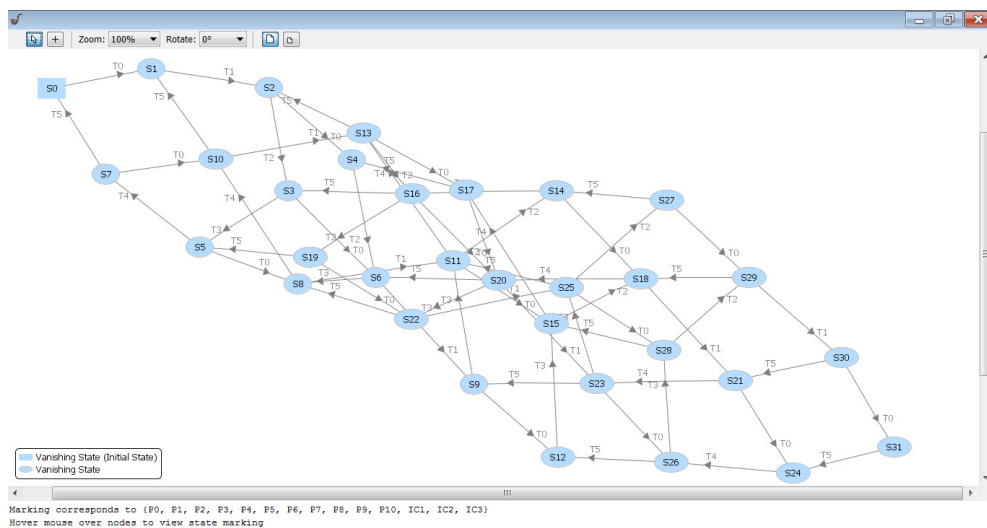


Figura 52 – Grafo de alcançabilidade da falha “Controle Supervisório Não Atua”.

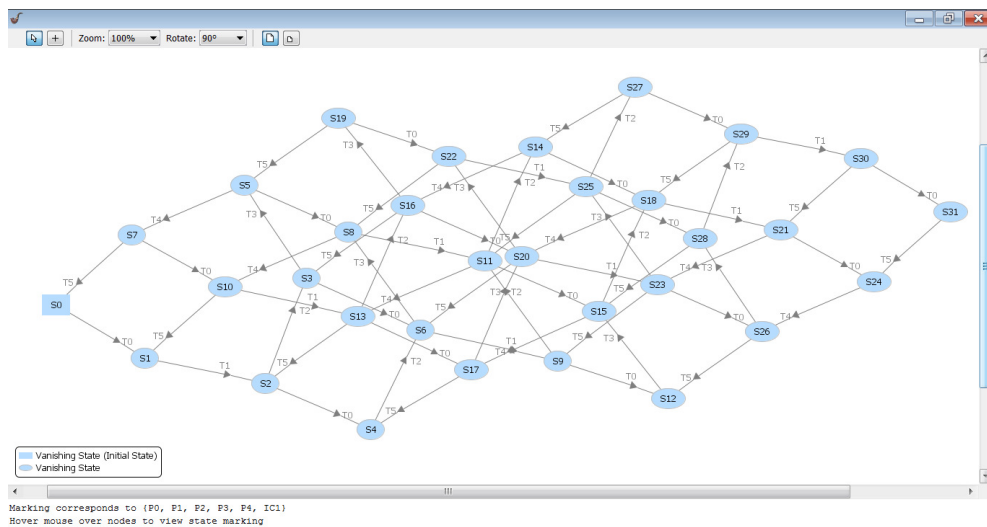


Figura 53 – Grafo de alcançabilidade da falha “Sem Corrente nos Sensores”.

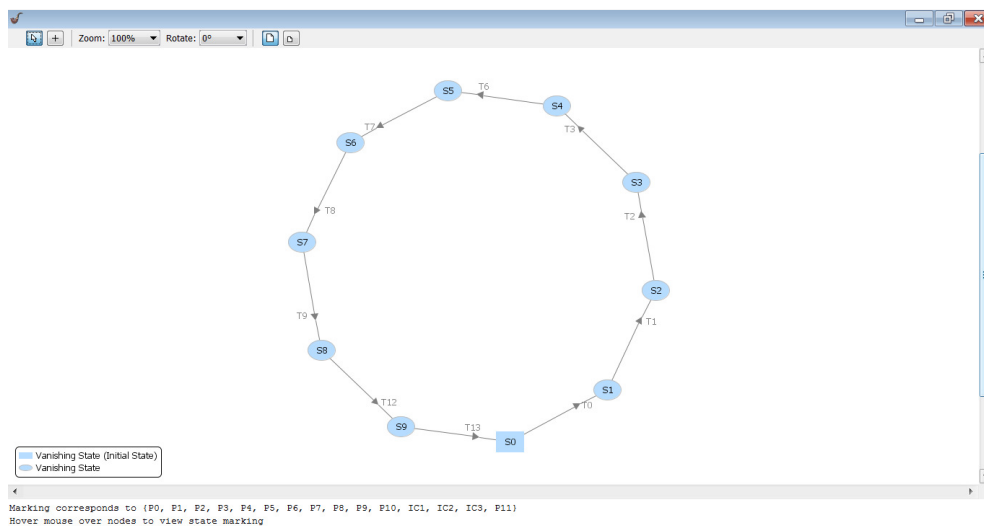


Figura 54 – Grafo de alcançabilidade da falha “Baixa Rotação do DAV”.

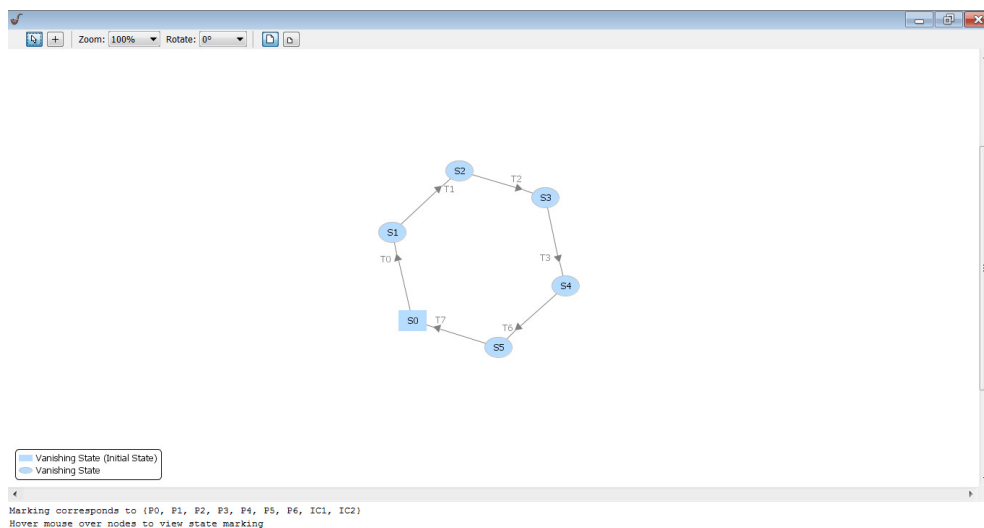


Figura 55 – Grafo de alcançabilidade da falha “Desalinhamento do Rotor Causando Desalinhamento Magnético”.

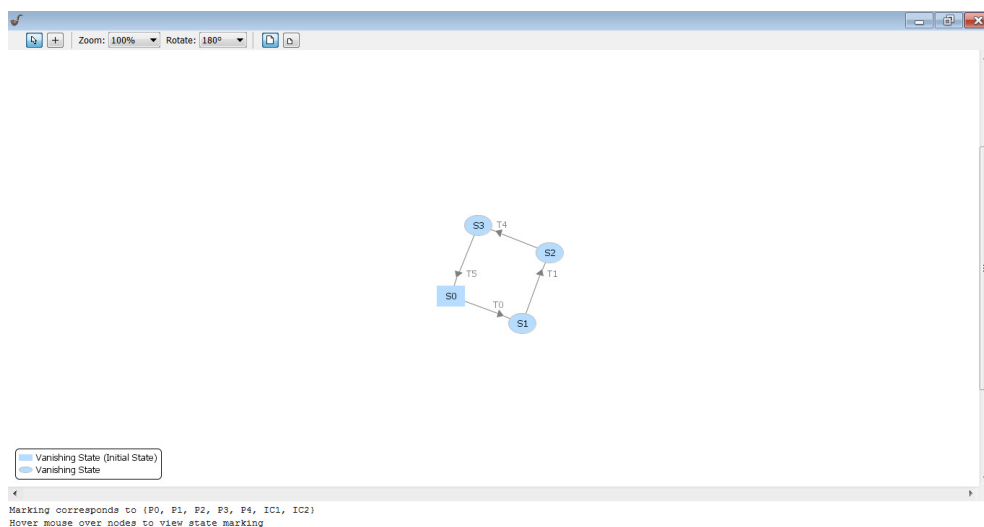


Figura 56 – Grafo de alcançabilidade da falha “Fim da Bateria”.

ANEXO A – ESTUDO HAZOP DO DAV EM ESTUDO

A seguir é apresentado o estudo HAZOP do dispositivo em estudo com a adição de três colunas para a caracterização das falhas e seleção da política de manutenção adequada para estas.

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
1	Sangue	Pressão de entrada do sangue no DAV (considerar o valor de referência dos seguintes pontos da curva Pressão X Batimentos: abertura da A-V; fechamento da válvula aórtica; abertura da válvula aórtica)	Sem	Pressão do sangue na entrada do DAV nula	Sem sangue na entrada da bomba por obstrução da cânula que liga o VE com a bomba;	DAV não auxilia o bombeamento de sangue		Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Cânula desconectada à montante do DAV	Hemorragia e morte	Nas duas conexões à montante do DAV .	Temos que assumir que há tempo de desenvolvimento devido à consequência	Aleatório	Manutenção Preventiva	Não há sensoriamento disponível para detectar esta variação de fluxo. Preventiva - rotina periódica de procedimentos para verificar se a cânula esta conectada de forma segura a ser determinada por corpo clínico. Corretiva - intervenção corpo clínico.
					Parada cardíaca	morte		-	-	-	-
			Menos	Pressão do sangue na entrada do DAV menor do que a esperada	Obstrução da cânula à montante do DAV	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e gera pressão negativa na entrada.	Obstrução por entupimento ou dobramento da cânula	Há TDF	Aleatório	Manutenção Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Paciente com pressão baixa;	Aguardando avaliação de equipe clínica		-	-	-	-
					Rotação alta do DAV (disparo do motor)	Aguardando avaliação de equipe clínica		Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Verificar estado dos sensores de controle de velocidade por meio de rotina de testes para encontrar causa do disparo da bomba.
			Mais	Pressão do sangue na entrada do DAV maior do que a esperada	Paciente com pressão alta	Aguardando avaliação de equipe clínica		-	-	-	-
					Baixa rotação do DAV	Refluxo através da bomba		Há TDF	Não Aleatório	Manutenção Preditiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético. Rotina para verificação de vibração do DAV.
					Desacoplamento magnético	Refluxo através da bomba	Verificar número de tentativas para reacoplamento	Falha pode ocorrer de forma "instantânea"	Não é necessariamente Aleatória	Manutenção Corretiva no desacoplamento. Preditiva para desalinhamento	Preditiva: verificação de intensidade do campo magnético entre motor e rotor para diagnosticar desalinhamento. Corretiva: O sistema reconhece a falha e tenta corrigi-la. Caso exceder n tentativas, ativar alarme e paciente deve ir ao hospital.
					Bomba desligada devido a quebra do cabo de alimentação	Refluxo através da bomba	Quebra de cabos de alimentação	Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Se houver carga na bateria e o DAV não estiver ligado, o paciente deve ir ao hospital. Caso contrário, se sinalizador de bateria com carga estiver desativado, o paciente deve substituí-la imediatamente.
					Bomba desligada devido a fim da bateria	Refluxo através da bomba	fim de bateria	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Ao sinalizar fim de bateria o paciente deve trocá-la.
			Reverso	Pressão da entrada do DAV reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
2	Sangue	Pressão da saída do DAV (considerar o valor de referência dos seguintes pontos da curva Pressão X Batimentos: abertura da A-V; fechamento da válvula aórtica; abertura da válvula aórtica)	Sem	Pressão do sangue na saída do DAV nula	Obstrução a montante do DAV?	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e gera pressão negativa na entrada.		Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Cânula desconectada a jusante	Hemorragia e morte		Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Não há sensoramento disponível para detectar esta variação de fluxo. Preventiva - rotina periódica de procedimentos para verificar se a cânula esta conectada de forma segura a ser determinada por corpo clínico. Corretiva - intervenção corpo clínico.
			Menos	Pressão do sangue na saída do DAV menor do que a esperada	Paciente com pressão baixa;	Aguardando avaliação de equipe clínica		-	-	-	-
					Bomba com rotação baixa	Não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Há TDF	Não Aleatório	Manutenção Preditiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético. Rotina para verificação de vibração do DAV.
			Mais	Pressão do sangue na saída do DAV maior do que a esperada	Paciente com pressão alta	Aumento da pressão aórtica		-	-	-	-
					Bomba com rotação alta	Aumento da pressão aórtica e possível refluxo através do ventrículo		Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Verificar estado dos sensores de controle de velocidade por meio de rotina de testes para encontrar causa do disparo da bomba.
					Obstrução à jusante do DAV	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e aumenta a pressão de saída.		Há TDF	Aleatório	Manutenção Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
			Reverso	Pressão da saída do DAV reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
3	Sangue	Fluxo através do DAV (considerar o valor de referência dos seguintes pontos da curva Pressão X Batimentos: abertura da A-V; fechamento da válvula aórtica; abertura da válvula aórtica)	Sem	Sem fluxo no DAV	Obstrução a montante do DAV.	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e gera pressão negativa na entrada.		Caso a cânula entupir aos poucos, existe TDF.	Aleatório	Manutenção Corretiva ou Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Obstrução a jusante do DAV.	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e aumenta a pressão de saída.		Caso a cânula entupir aos poucos, existe TDF.	Aleatório	Manutenção Corretiva ou Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					DAV isolado (obstrução a montante E a jusante)	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e gera pressão negativa na entrada e aumento na pressão de saída.		Falha instantânea	Aleatório	Manutenção Corretiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Pressão de entrada mais pressão adicionada pela bomba igual à pressão da aorta	Nenhuma	Coração do paciente está se recuperando	-	-	-	-
			Menos	Fluxo menor que o esperado no DAV	Rotação baixa no DAV	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada	Pode acontecer quando o DAV está no modo manual	Há TDF	Não Aleatório	Manutenção Preditiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético. Rotina para verificação de vibração do DAV.
					Obstrução parcial na cânula	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Há TDF	Aleatório	Manutenção Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Desgaste do DAV	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva ou Preventiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético. Rotina para verificação de vibração do DAV.

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
3	Sangue	Fluxo através do DAV (considerar o valor de referência dos seguintes pontos da curva Pressão X Batimentos: abertura da A-V; fechamento da válvula aórtica; abertura da válvula aórtica)	Mais	Fluxo maior que o esperado no DAV	Rotação alta do DAV	Aguardando avaliação de equipe clínica					
					Pressão de entrada elevada	Aguardando avaliação de equipe clínica		Falha avaliada no item 1			Rotinas que tratam pressão de entrada alta
					Pressão de saída baixa	Aguardando avaliação de equipe clínica		Falha avaliada no item 2			Rotinas que tratam pressão de saída baixa
					Cânula desconectada na aorta	Hemorragia e morte		Temos que supor que há TDF	Aleatório	Manutenção Preditiva	Não há sensoramento disponível para detectar esta variação de fluxo. Preventiva - rotina periódica de procedimentos para verificar se a cânula esta conectada de forma segura a ser determinada por corpo clínico. Corretiva - intervenção corpo clínico.
			Reverso	Fluxo com sentido contrário ao esperado	Baixa rotação do DAV;	DAV prejudica a circulação sanguínea		Há TDF	Não Aleatório	Manutenção Preditiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético.
					Desacoplamento magnético	Refluxo através da bomba	Verificar número de tentativas para reacoplamento	Falha pode ocorrer de forma "instantânea"	Não é necessariamente Aleatória	Manutenção Corretiva no desacoplamento. Preditiva para desalinhamento	Preditiva: verificação de intensidade do campo magnético entre motor e rotor para diagnosticar desalinhamento. Corretiva: O sistema reconhece a falha e tenta corrigi-la. Caso exceder n tentativas, ativar alarme e paciente deve ir ao hospital.
					Bomba desligada devido a falta de energia.	Refluxo através da bomba		Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Ao sinalizar fim de bateria o paciente deve trocá-la.
					Cânula desconectada a jusante	Hemorragia e morte		Temos que supor que há TDF	Aleatório	Manutenção Preditiva	Não há sensoramento disponível para detectar esta variação de fluxo. Preventiva - rotina periódica de procedimentos para verificar se a cânula esta conectada de forma segura a ser determinada por corpo clínico. Corretiva - intervenção corpo clínico.

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
4	DAV	Consumo de corrente (considerar o valor de referência dos seguintes pontos da curva Pressão X Batimentos: abertura da A-V; fechamento da válvula aórtica; abertura da válvula aórtica)	Sem	Sem consumo de corrente	Sem bateria	Refluxo através da bomba		Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Se houver carga na bateria e o DAV não estiver ligado, o paciente deve ir ao hospital. Caso contrário, se sinalizador de bateria com carga estiver desativado, o paciente deve substituí-la imediatamente.
			Menos	Consumo de corrente menor que o esperado	Pressão de entrada elevada	Nenhuma		-	-	-	-
					Pressão de saída baixa	Nenhuma		-	-	-	-
					Circuito eletrônico do supervisorio danificado	Sistema de controle supervisorio do DAV não funciona		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Verificar estado dos sensores de controle de velocidade por meio de rotina de testes para encontrar causa de baixo consumo de corrente. Paciente deve ir ao hospital para realizar a manutenção corretiva do circuito eletrônico.
					Circuito eletrônico do controle local danificado	Sistema de controle local do DAV não funciona		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Verificar estado dos sensores de controle de velocidade por meio de rotina de testes para encontrar causa de baixo consumo de corrente. Paciente deve ir ao hospital para realizar a manutenção corretiva do circuito eletrônico.
			Mais	Consumo de corrente maior que o esperado	Pressão de entrada baixa	Consumo rápido da bateria		Falha avaliada no item 1			Rotinas que tratam pressão de entrada baixa
					Pressão de saída elevada	Consumo rápido da bateria		Falha avaliada no item 2			Rotinas que tratam pressão de saída elevada
					Aumento do atrito	Consumo rápido da bateria		Há TDF	Periódico	Manutenção preventiva ou Preditiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético. Rotina para verificação de vibração do DAV.
			Reverso	Consumo de corrente Reversa	Não é possível?			-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
5	Motor da Bomba	Torque do motor da bomba do (considerar o valor de referência dos seguintes pontos da curva Pressão X Batimentos: abertura da A-V; fechamento da válvula aórtica; abertura da válvula aórtica)	Sem	Sem torque no motor	Bobina do motor queimada	Possibilidade de refluxo		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Paciente encaminhado para Hospital para troca da bomba.
			Menos	Torque no motor próximo de zero	Desacoplamento magnético	Refluxo através da bomba		Falha pode ocorrer de forma "instantânea"	Não é necessariamente Aleatória	Manutenção Corretiva no desacoplamento. Preditiva para desalinhamento	Preditiva: verificação de intensidade do campo magnético entre motor e rotor para diagnosticar desalinhamento. Corretiva: O sistema reconhece a falha e tenta corrigi-la. Caso exceder n tentativas, ativar alarme e paciente deve ir ao hospital.
				Torque no motor menor que o esperado	Fluxo maior que o esperado	Consequências relacionadas ao fluxo maior que o esperado		Falha avaliada no item 3			Rotinas que tratam fluxo alto no DAV
			Mais	Torque no motor maior que o esperado	Atrito no rotor.	Aquecimento do DAV		Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina para verificação do alinhamento do rotor e do estado do mancal magnético. Rotina para verificação de vibração do DAV.
					Obstrução a montante do DAV.	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e gera pressão negativa na entrada.		Caso a cânula entupir aos poucos, existe TDF.	Aleatório	Manutenção Corretiva ou Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Obstrução a jusante do DAV.	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e aumenta a pressão de saída.		Caso a cânula entupir aos poucos, existe TDF.	Aleatório	Manutenção Corretiva ou Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					DAV isolado (obstrução a montante E a jusante)	DAV não auxilia o bombeamento de sangue e gera pressão negativa na entrada e aumento na pressão de saída.		Falha instantânea?	Aleatório	Manutenção Corretiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
					Obstrução parcial na cânula	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Há TDF	Aleatório	Manutenção Preditiva	Ativar rotina para acelerar e desacelerar DAV. Caso esteja abaixo do esperado, acelerar durante período T para provocar o desentupimento. Após n tentativas fracassadas, gerar alarme.
			Reverso	Torque no motor Reverso	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
6	Malha de controle Local	Atuação	Sem	Sem atuação	Falta de alimentação na malha de controle local	Possibilidade de refluxo		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Se houver carga na bateria e o DAV não estiver ligado, o paciente deve ir ao hospital. Caso contrário, se sinalizador de bateria com carga estiver desativado, o paciente deve substituí-la imediatamente.
					Quebra do controlador	Possibilidade de refluxo		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Se houver carga na bateria e o DAV não estiver ligado, o paciente deve ir ao hospital. Caso contrário, se sinalizador de bateria com carga estiver desativado, o paciente deve substituí-la imediatamente.
			Menos	Sinal de controle abaixo do esperado	Mal funcionamento do controle	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Rotina de teste dos sensores e atuadores SIS. Diagnosticada a falha o paciente deve ir ao hospital para troca/reprogramação do controlador.
			Mais	Sinal de controle saturado	Mal funcionamento do controle	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Rotina de teste dos sensores e atuadores SIS. Diagnosticada a falha o paciente deve ir ao hospital para troca/reprogramação do controlador.
			Reverso	Controle reage de forma reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
7	Controle Supervisório	Controle	Sem	Sem atuação	Falta de alimentação na malha de controle supervisão	Atuação restrita à malha de controle local		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Rotina de teste dos atuadores SIS. Diagnosticada a falha o paciente deve ir ao hospital para troca/reprogramação do controlador.
					Quebra do controlador	Atuação restrita à malha de controle local		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Rotina de teste dos atuadores SIS. Diagnosticada a falha o paciente deve ir ao hospital para troca/reprogramação do controlador.
			Menos	Sinal de controle abaixo do esperado	Mal funcionamento do controle	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Rotina de teste dos sensores e atuadores SIS. Diagnosticada a falha o paciente deve ir ao hospital para troca/reprogramação do controlador.
			Mais	Sinal de controle saturado	Mal funcionamento do controle	DAV não auxilia o bombeamento de sangue de forma adequada		Não há TDF	Aleatória	Manutenção Corretiva	Rotina de teste dos sensores e atuadores SIS. Diagnosticada a falha o paciente deve ir ao hospital para troca/reprogramação do controlador.
			Reverso	Controle reage de forma reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
8	Rotor da bomba	Rotação	Sem	Sem rotação	Bomba desligada devido a falta de energia.	Possibilidade de refluxo		Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Se houver carga na bateria e o DAV não estiver ligado, o paciente deve ir ao hospital. Caso contrário, se sinalizador de bateria com carga estiver desativado, o paciente deve substituí-la imediatamente.
					Desacoplamento magnético	Refluxo através da bomba		Falha pode ocorrer de forma "instantânea"	Não é necessariamente Aleatória	Manutenção Corretiva no desacoplamento. Preditiva para desalinhamento	Preditiva: verificação de intensidade do campo magnético entre motor e rotor para diagnosticar desalinhamento. Corretiva: O sistema reconhece a falha e tenta corrigi-la. Caso exceder n tentativas, ativar alarme e paciente deve ir ao hospital.
			Menos	Rotação menor que a esperada	Não é possível	-	-	-	-	-	-
			Mais	Rotação maior que a esperada	Não é possível	-	-	-	-	-	-
			Reverso	Rotação reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
9	Sensor de corrente	Corrente de alimentação do Sensor	Sem	Sem corrente no sensor de corrente	Rompimento no circuito;	Mal funcionamento do SIS		Não há TDF	Aleatório	Manutenção Corretiva	Fazer teste de variação de corrente no atuador para verificar resposta do sensor de corrente.
			Menos	Corrente no sensor de corrente menor que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Mais	Corrente no sensor de corrente maior que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Reverso	Corrente de alimentação do Sensor Reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
10	Sensor de Pressão de Entrada do DAV	Corrente de alimentação do Sensor	Sem	Sem corrente no sensor de pressão de entrada	Rompimento no circuito;	Mal funcionamento do SIS		Não há TDF	Sim	Manutenção Corretiva	Verificar estado dos sensores de pressão por meio de rotina de testes.
			Menos	Corrente no sensor de pressão de entrada menor que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Mais	Corrente no sensor de pressão de entrada maior que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Reverso	Corrente de alimentação do Sensor Reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
11	Sensor de Pressão de Saída do DAV	Corrente de alimentação do Sensor	Sem	Sem corrente no sensor de pressão de saída	Rompimento no circuito;	Mal funcionamento do SIS		Não há TDF	Sim	Manutenção Corretiva	Verificar estado dos sensores de pressão por meio de rotina de testes.
			Menos	Corrente no sensor de pressão de saída menor que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Mais	Corrente no sensor de pressão de saída maior que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Reverso	Corrente de alimentação do Sensor Reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-

Nº	Elemento	Característica	Palavra Guia	Desvio	Possíveis Causas	Consequências	Comentários	Tempo de Desenvolvimento de Falha	Aleatoriedade	Política selecionada	Ações
12	Sensor de Fluxo na Saída do DAV	Corrente de alimentação do Sensor	Sem	Sem corrente no sensor de pressão de saída	Rompimento no circuito;	Mal funcionamento do SIS		Não há TDF	Sim	Manutenção Corretiva	Verificar estado do sensor de fluxo por meio de rotina de testes.
			Menos	Corrente no sensor de pressão de saída menor que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Mais	Corrente no sensor de pressão de saída maior que a esperada	Sensor Descalibrou	Mal funcionamento do SIS	-	Há TDF	Periódico	Manutenção Preditiva	Rotina de verificação da calibração do sensor
			Reverso	Corrente de alimentação do Sensor Reversa	Não é possível	-	-	-	-	-	-