

**Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica**

Giulliene Pereira Rodrigues

Modelagem de um veículo elétrico utilizando Redes de Petri

**Paraíba - PB
Junho – 2017**

GIULLIENE PEREIRA RODRIGUES

**MODELAGEM DE UM VEÍCULO ELÉTRICO UTILIZANDO REDES
DE PETRI**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a Coordenação de Engenharia
Elétrica como um dos pré-requisitos para a
obtenção do título em Bacharel em
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.
Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva.**

Paraíba – PB

Junho – 2017

R618m Rodrigues, Giulliene Pereira

Modelagem de um veículo elétrico utilizando redes de Petri./ Giulliene Pereira Rodrigues. – João Pessoa, 2017.

66f. il.:

Orientador: Dr. Prof. Juan Moises Maurício Villanueva.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Modelagem 2. Redes de Petri 3. Transformadas Wavelet
4. Veículo Elétrico I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 621.3 (043)

Giulliene Pereira Rodrigues

Modelagem de um veículo elétrico usando redes de Petri e otimização dos padrões de teste utilizando algoritmos genéticos

Trabalho de Conclusão de Curso Submetido a Coordenação de Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Euler Cássio Tavares de Macedo (Membro)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Lucas Vinícius Hartmann (Membro)
Universidade Federal da Paraíba

Paraíba – PB
Junho - 2017

AGRADECIMENTOS

A meu pai pelo amor, paciência e incentivo e que apesar de todas as dificuldades sempre está ao meu lado.

A minha avó Glória e minha tia Gizelda, minhas mães e amigas de coração, que nunca deixaram de acreditar na minha capacidade.

Ao meu esposo pelo amor, compreensão e apoio durante todos esses anos de curso.

A minha princesa Sofia, que não para de crescer e reclamar que eu não lhe dou a devida atenção. Obrigado pelo amor e carinho de todos os dias.

Ao meu tio Felisberto e minha tia Roseane que sempre me inspiraram.

Aos meus irmãos que estão sempre ao meu lado, independente da situação.

Aos meus sogros pela paciência e apoio.

Ao professor Juan Villanueva, pela orientação e paciência durante todo o projeto.

Ao meu coordenador Mj. Junior por conseguir administrar meu expediente e aos meus colegas de trabalho que proporcionaram a conclusão deste curso.

E a todos os familiares, amigos e colegas que tiveram a compreensão necessária quando precisei me ausentar para a conclusão desse curso e que colaboraram direta ou indiretamente.

RESUMO

A preocupação com questões ambientais, preservação dos recursos naturais, e com a qualidade de vida da população tem forçado uma mudança na indústria automobilística mundial. A preocupação com as emissões de gases poluente e o consumo de combustíveis fósseis fez do estudo e projeto de veículos que utilizam fontes alternativas de energia uma realidade. Este trabalho apresenta a modelagem e análise do veículo elétrico por meio da teoria de redes de Petri. Para sua elaboração serão apresentados os fundamentos básicos da teoria de sistemas, em que é definido o conceito de eventos discretos, o qual é o tipo de sistema modelado por redes de Petri que iremos abordar para os veículos elétricos. Nos fundamentos sobre as redes de Petri serão introduzidos os conceitos dos seus elementos básicos e a dinâmica da transição de estados. As redes de Petri possuem propriedades que são brevemente descritas e que proporcionarão a análise do sistema. O veículo utilizado como referência é o modelo desenvolvido pelos alunos da UFPB para a competição Fórmula-E SAE/ Brasil, serão abordados os fundamentos e principais características para o entendimento de sua dinâmica veicular, e a partir destas características será construído um modelo utilizando as redes de Petri. A estruturação da rede de Petri foi realizada utilizando o método de composição modular. O modelo final em rede de Petri apresenta a interconexão entre os módulos facilitando seu entendimento e futuras alterações.

Palavras-Chaves: Modelagem, Redes de Petri, Veículo Elétrico

ABSTRACT

Concern about environmental issues, preservation of natural resources and the population's quality of life has forced change in the world's automotive industry. The concern about emissions of polluting gases and consumption of fossil fuels has made the study and design of vehicles using alternative energy sources a reality. This work presents the modeling and analysis of the electric vehicle through the theory of Petri nets. For its development will be presented the basics of systems theory, which defines the discrete events, which is the type of system modeled by Petri nets that we will approach for the electric vehicles. In the grounds on the Petri nets concepts of its elements and dynamics of state will be introduced. The Petri nets have properties which are briefly described and to provide analysis of the system. The vehicle used as a reference is the model designed by students of UFPB for competition Formula-E SAE / Brazil, the fundamentals and main characteristics for the understanding of its vehicular dynamics will be addressed and from these features will be built a model using Petri nets. The structure of the Petri net was performed using the modular composite method. The final model in Petri net shows the interconnection between the modules facilitating their understanding and future changes.

Palavras-Chaves: Modeling, Petri nets, Electric Vehicle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação dos sistemas	17
Figura 2.2 – Exemplo de sistema invariante no tempo	18
Figura 2.3 – Representação dos Sistemas: a) discretizado; b) discreto; c) a eventos discretos	19
Figura 2.4 – Modelo do veículo elétrico.....	21
Figura 2.5 – Diagrama de blocos do inversor.....	25
Figura 3.1 – Redes de Petri.....	33
Figura 3.2 – Representação Matricial da RdP da Figura 3.1	35
Figura 3.3 – Sequência de processos	35
Figura 3.4 – a) Divisão; b) Junção.....	36
Figura 3.5 – a) Caminhos alternativos; b) Repetição	37
Figura 3.6 – Partilhamento de um recurso.....	38
Figura 4.1 – Interconexões entre Módulos	41
Figura 4.2 – Circuito elétrico simplificado equivalente de uma bateria.....	42
Figura 4.3 – Modelo de circuito para a bateria.....	44
Figura 4.4 – Módulo da bateria	45
Figura 4.4 – Módulo de controle	47
Figura 4.6 – Relação Torque x Velocidade (rpm) do motor YASA – 750.....	48
Figura 4.7 – Variáveis de entrada e saída de um motor	48
Figura 4.8 – Modelagem do motor	50
Figura 4.9 – Transições e estados do módulo motor	50
Figura 4.10 – Módulo da transmissão	51
Figura 4.11 – Fluxo de potência no veículo na etapa da frenagem regenerativa	52
Figura 4.13 – Módulo do sistema de Frenagem	53
Figura 4.14 – Modelo completo do Veículo elétrico.....	54
Figura 5.1 – Árvore de alcançabilidade, pelo <i>software</i> PIPE.....	58
Figura 5.2 – Matriz de incidência, pelo <i>software</i> PIPE.....	59
Figura 5.3 – Detalhes da limitação, pelo <i>software</i> PIPE	60
Figura 5.4 – Análise da vivacidade e segurança, pelo <i>software</i> PIPE.....	61
Figura 5.5 – Gráfico do percentual de utilização	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Interpretações típicas de transições e lugares (MONTEZANO, 2009).	32
Tabela 4.1 – Exemplo da relação entre OCV e SOC para uma bateria (OGAWA,2011).	43
Tabela 4.2 – Variáveis de controle da bateria	44
Tabela 4.3 – Variáveis de controle	46
Tabela 4.4 – Variáveis do módulo do motor	49
Tabela 4.5 – Definição dos estados da rede de Petri do modelo do veículo elétrico	55
Tabela 4.6 – Definição das transições da rede de Petri do modelo do veículo elétrico	56
Tabela 5.1 – Tabela com dados da simulação.	62

LISTA DE SIGLAS

ABVE: Associação Brasileira do Veículo Elétrico
BB: Banco de Baterias
CaC: Célula a Combustível
FR: Frenagem Regenerativa
IA: Inteligência Artificial
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
MCI: Motor de Combustão Interna
ME: Motor Elétrico
PEPI: Platform Independent Petri Net Editor
RdP: Rede de Petri
VE: Veículo Elétrico
VEB: Veículo Elétrico a Bateria
VECaC: Veículo Elétrico de Célula a Combustível
VEH: Veículo Elétrico Híbrido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Considerações Preliminares.....	13
1.2. Motivação	14
1.3. Metodologia Adotada	14
1.4. Objetivos.....	15
1.4.1. Objetivo Geral	15
1.4.2. Objetivos Específicos	15
1.5. Organização do Documento	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. Definições Preliminares sobre Sistemas.....	16
2.1. Sistemas Estáticos e Dinâmicos	17
2.2. Sistemas Dinâmicos Variantes e Invariantes no Tempo	17
2.3. Sistemas Lineares e Não Lineares	18
2.4. Sistemas Determinísticos e Estocásticos	18
2.5. Sistemas a Eventos Discretos	19
2.6. O Veículo Elétrico	20
2.6.1. Bateria.....	22
2.6.1.1. Bateria de chumbo-ácido	22
2.6.1.2. Níquel Cádmio	23
2.6.1.3. Níquel Metal Hidreto.....	23
2.6.1.4. Lítio-Íon.....	23
2.6.1.5. Densidade de Energia	24
2.6.1.6. Eficiência Energética.....	24
2.6.2. Modulo de Controle.....	24
2.6.3. Motor elétrico	25
2.6.4. Transmissão	26
2.6.5. Freio Regenerativo	27
2.7. Formula SAE.....	28

3. REDES DE PETRI.....	30
3.1. Noções básicas.....	30
3.2. Máquina de estados finitos	31
3.3. Processo de construção das Redes de Petri	31
3.3.1. Elementos básicos	32
3.3.2. Propriedades da Rede de Petri	38
3.3.3. Programas para Análise das Redes de Petri.....	40
3.3.4. Vantagens da Utilização das Redes de Petri.....	40
4. MODELAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO UTILIZANDO RDP.....	41
4.1. Bateria.....	42
4.1.1. Tensão.....	42
4.1.2. Capacidade de carga	43
4.1.3. Modelo da bateria	44
4.2. Modulo de controle.....	45
4.3. Motor elétrico	47
4.4. Transmissão	51
4.5. Freio regenerativo.....	51
4.6. Modelo completo do veículo elétrico	53
5. ANÁLISE DO MODELO DAS REDES DE PETRI.....	58
5.1. Árvore de alcançabilidade	58
5.2. Matrizes e equações de estados	59
5.3. Limitabilidade e Segurança	60
5.4. Vivacidade	60
5.5. Reversibilidade	61
5.6. Análise da simulação	61
6. CONCLUSÕES.....	64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Preliminares

Uma das características mais importantes do transporte sustentável é o uso eficaz da energia. Veículos mais leves e motores mais eficientes contribuem para a preservação dos recursos naturais e diminuição das emissões de gases na atmosfera. O setor de transporte é o principal responsável pelas emissões nos grandes centros urbanos (REVOREDO,2007).

Uma opção para diminuir a utilização de combustíveis fósseis e melhorar a qualidade do ar nas metrópoles é a utilização de veículos elétricos (VE). Isto pode ser possível com o advento de novas tecnologias e diminuição de custos de produção de baterias e painéis fotovoltaicos.

Após ser superada anteriormente por modelos propulsionados por motores a combustão, os VE reapareceram no cenário automotivo mundial. Motivados por fatores como a superação de barreiras tecnológicas e as preocupações ambientais, vários governos têm apoiado a solução, levando todas as montadoras de automóveis a investir em projetos de veículos elétricos (CASTRO, 2010).

A modelagem de sistemas deve ser considerada na etapa de um projeto de diferentes formas, visto que ela proporciona uma descrição e viabilidade técnica de um sistema. Para melhor entendimento de modelagem é necessário compreender o conceito de modelo, que é a representação de um determinado sistema. Este modelo pode ser simplificado, reproduzindo apenas certos componentes, com características específicas a serem analisadas, assim, constroem-se modelos que levam em conta apenas os parâmetros e variáveis pertinentes ao estudo.

Existem dois tipos de modelos: modelos contínuos e modelos discretos. No primeiro, os estados do sistema mudam continuamente em função do tempo; são formados geralmente por uma série de equações matemáticas que descrevem as iterações entre diferentes elementos do sistema. No segundo, os estados do sistema mudam somente no instante em que ocorre um evento; para todos os demais instantes de tempo nada se modifica.

Os sistemas de automação e controle que iremos tratar serão do tipo a eventos discretos e requerem linguagens e ferramentas de modelagem específicas. Entre as ferramentas formais de modelagem tem-se: o Modelo de Cadeia Markov, o Modelo de

Processo Geral Semi Markoviano, o Modelo de Teoria de Filas, o Modelo de Autômato e a Abordagem de Máquina de Estado-Finito, o Modelo de Álgebra Min-Max, o Modelo de Formalismo de Processos Finitamente Recursivos e o Modelo de Redes. Dentre estas linguagens existentes utilizaremos as Rede de Petri (RdP), por ser uma ferramenta gráfica e matemática que consegue se adaptar a inúmeras aplicações, podendo-se modelar processos com requisitos funcionais de sequenciamento, exclusão mútua, paralelismo, união, etc.

1.2. Motivação

Em muitas áreas da ciência e da engenharia é de interesse criar modelos que permitam analisar a complexidade de um problema, por meio de simulação e implementação de técnicas de controle, assim como entender as principais características da dinâmica de sistemas, tanto em tempo contínuo quanto aqueles sistemas baseados em eventos discretos.

A modelagem do veículo elétrico através das redes de Petri (RdP) proporcionará uma ferramenta computacional de análise dos módulos que constituem o veículo elétrico tais como, o sistema de carregamento das baterias e de aproveitamento da energia por freio regenerativo, sistema de controle, sistema motor e sistema de transmissão.

1.3. Metodologia Adotada

A revisão bibliográfica foi realizada a partir dos materiais já publicados como livros, artigos científicos, defesas de trabalho de conclusões de cursos e defesas de teses de mestrado

Os modelos estudados usualmente tratam do veículo elétrico como blocos separados. As análises são realizadas para os componentes de maneira independentes.

A partir do modelo proposto pela Fórmula-E SAE para o carro elétrico, foi possível modelar um sistema genérico que pode ser utilizado para carros convencionais. Foi utilizada a RdP como ferramenta para modelar o sistema do VE.

O programa PIPE (*Platform Independent Petri Net Editor*) foi utilizado como ferramenta computacional para a verificação da modelagem e simulação do sistema a eventos discretos do modelo do veículo elétrico usando redes de Petri.

1.4. Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso estão divididos em objetivo geral e específicos conforme se descreve a seguir.

1.4.1. Objetivo Geral

Modelagem, simulação e análise do carro elétrico baseado nas diretrizes da Formula-E SAE/Brasil utilizando a teoria de Redes de Petri.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Modelar o sistema do VE utilizando RdP;
- Validação e análises do modelo por meio da ferramenta computacional PIPE.

1.5. Organização do Documento

O documento é organizado da seguinte forma:

É apresentado no capítulo 1 a introdução com os principais objetivos e a motivação para a realização desse trabalho.

É apresentado no capítulo uma revisão teórica, na qual é definido o tipo de sistema que iremos trabalhar e a referência utilizada para implementar o modelo do veículo elétrico.

É apresentado no capítulo 3 o estudo sobre as redes de Petri.

É apresentado no capítulo 4 a modelagem do veículo elétrico empregando o modelo de redes de Petri.

É apresentado no capítulo 5 a análise do modelo obtido.

É apresentado no capítulo 6 as conclusões após a construção e análise do modelo e define alguns trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado todo embasamento teórico referente aos critérios fundamentais pelos quais os sistemas são classificados, apresentando as características principais de um sistema a eventos discretos.

Também serão apresentados os fundamentos básicos e as principais características do veículo sob estudo, tais como: conceito e estrutura. O intuito é descrever o sistema que será modelado em redes de Petri.

2.1. Definições Preliminares sobre Sistemas

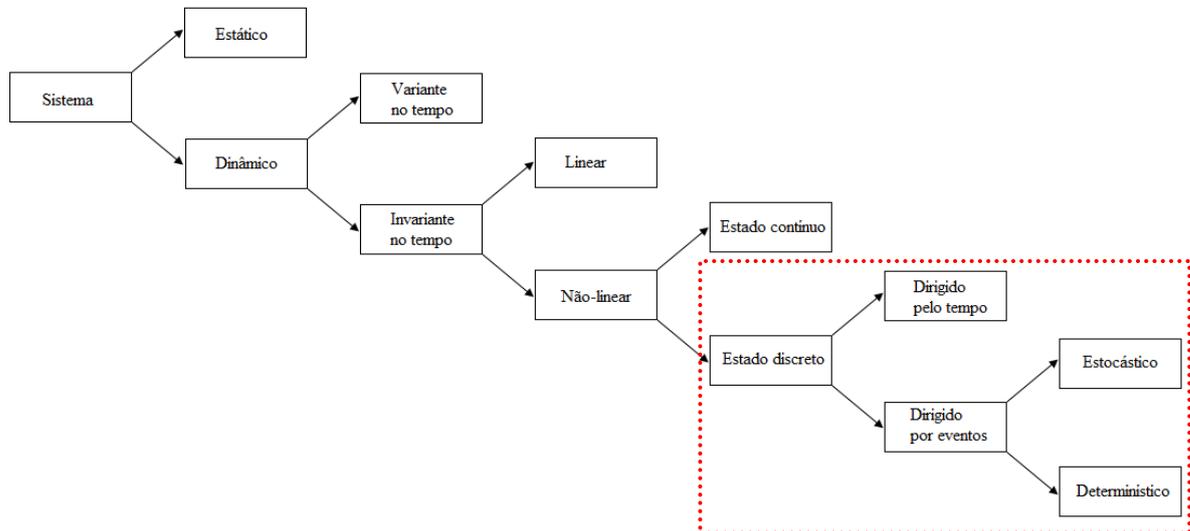
De acordo com o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) podemos definir um sistema da seguinte maneira:

“Um sistema é uma combinação de componentes que atuam em conjunto para desempenhar uma função que é impossível de ser realizada por uma de suas partes individualmente” (MONTEZANO,2009).

Devido a sua complexidade, para melhor entendimento de um sistema real é elaborado um novo modelo. A modelagem de sistemas permite a solução de problemas reais de engenharia e a construção de sistemas práticos que desempenham um conjunto de funções desejáveis com eficiência e economia.

Os sistemas são classificados de acordo com suas propriedades. São apresentadas na Figura 2.1 as principais classificações dos sistemas. Em seguida, serão estudados os diferentes tipos de sistemas, com o intuito de delimitar o escopo deste trabalho em sistemas a eventos discretos.

Figura 2.1 – Classificação dos sistemas



Fonte: Autora

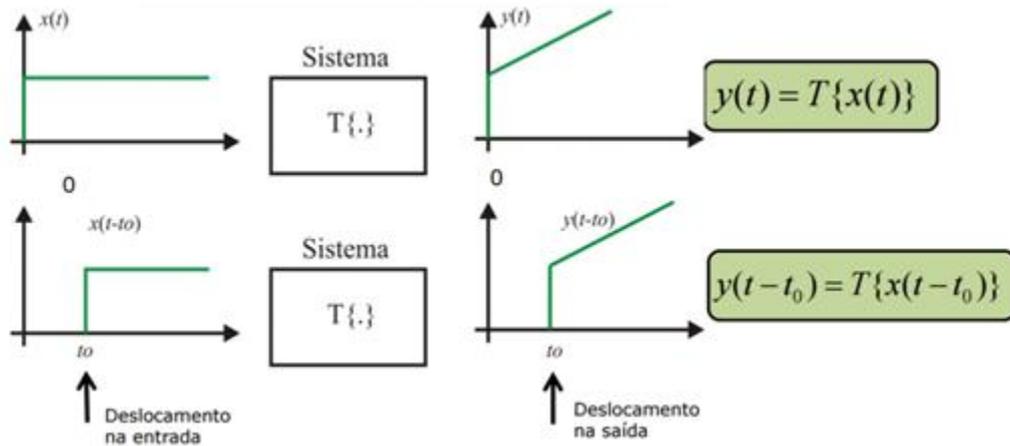
2.1. Sistemas Estáticos e Dinâmicos

Um sistema é dito estático quando a sua saída, em um determinado instante, depende somente do valor da entrada. Ele é dito dinâmico quando sua saída naquele instante depende dos valores passados da entrada.

2.2. Sistemas Dinâmicos Variantes e Invariantes no Tempo

Um sistema é dinâmico invariante no tempo quando a seguinte propriedade é verdadeira: quando uma função de entrada é aplicada ao sistema e passado alguns instantes de tempo a função de entrada resultante é idêntica a obtida inicialmente, apenas deslocada algumas unidades de tempo, caso contrário o sistema é dito variante. Ou seja, um sistema é invariante no tempo se para um deslocamento no tempo do sinal de entrada, este causa um deslocamento no tempo no sinal de saída, como ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Exemplo de sistema invariante no tempo



Fonte: (SlidePlayer)¹

2.3. Sistemas Lineares e Não Lineares

Os sistemas dinâmicos invariantes no tempo podem ser classificados em lineares ou não-lineares. A linearidade está associada ao princípio da superposição, ou seja, se as entradas $u_1(t)$ e $u_2(t)$ levam às saídas $y_1(t)$ e $y_2(t)$, respectivamente, então a entrada $u(t) = \alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t)$, para todo $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$. Quando alguma dessas propriedades não for satisfeita, o sistema será dito não linear (MONTEZANO,2009).

2.4. Sistemas Determinísticos e Estocásticos

Quando para uma dada entrada existe uma única saída, para as mesmas condições iniciais, o sistema é dito determinístico. Quando para uma dada entrada a saída for definida em termos probabilísticos o sistema é dito estocástico.

¹ Disponível em : <http://slideplayer.com.br/slide/5629875/>; Acesso em maio de 2017.

2.5. Sistemas a Eventos Discretos

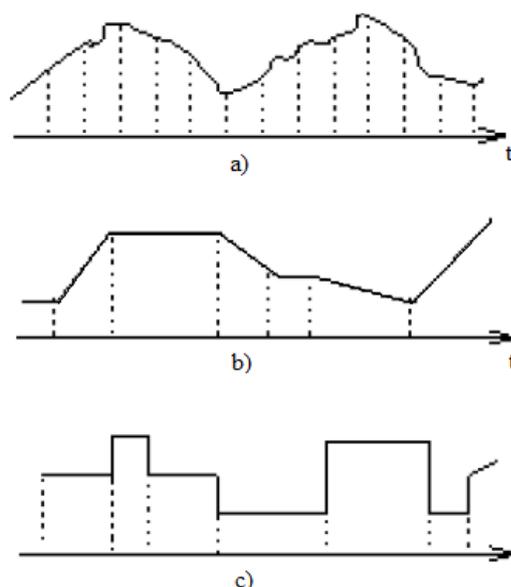
Um sistema discreto, de um modo geral, é um sistema no qual as mudanças de estado ocorrem em instantes precisos, pontos distintos.

Sistemas discretizados são sistemas estudados somente em instantes precisos, ou seja, sistemas contínuos observados em instantes discretos. Como exemplo de um sistema discretizado temos a Figura 2.3a. As variáveis de estado evoluem de maneira contínua, sem mudança brusca de comportamento, mas só existe interesse em conhecer seu valor em alguns instantes do tempo (CARDOSO,1997).

Sistemas discretos são sistemas para os quais os valores das variáveis de estado variam bruscamente a cada instante. No entanto, estes instantes não podem fundamentalmente ser previstos e o conhecimento do estado a um dado instante não permite que, sem cálculo, se conheça o estado seguinte (CARDOSO,1997). Podemos observar na Figura 2.3b um exemplo de um sistema discreto.

Sistemas a eventos discretos são sistemas modelados de tal forma que as variáveis de estado variam bruscamente devido à ocorrência de eventos em instantes determinados e que os valores das variáveis nos estados seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores precedentes e sem ter que considerar o tempo entre estes dois instantes (CARDOSO,1997). É apresentado na Figura 2.3c um exemplo de um sistema a evento discreto.

Figura 2.3 – Representação dos Sistemas: a) discretizado; b) discreto; c) a eventos discretos



Fonte: (CARDOSO,1997)

2.6. O Veículo Elétrico

O veículo elétrico teve sua origem no início do século XIX, mas comercialmente só surgiu no final do mesmo século. Os menores níveis de ruído, a ausência de vibrações e a inexistência de marchas eram as principais vantagens desses veículos, pois como a malha viária ainda era precária a autonomia era um atributo sem valorização.

O crescimento a baixo custo de derivados de petróleo e uma legislação ambiental ainda precária, associadas a um estágio mais primitivo das baterias, foram fundamentais para o fracasso da eletrificação veicular. Avanços tecnológicos, como a partida elétrica, e a melhoria das malhas viárias aumentaram a atração dos veículos a combustão.

Entretanto, com o aumento da preocupação com questões ambientais e com a qualidade de vida da população, o estudo e projeto de veículos elétricos tornou-se uma alternativa. Veículos mais leves e motores mais eficientes que colaboram para a redução de emissões de dióxido de carbono na atmosfera. A evolução tecnológica dos meios de acumulação e transformação da energia elétrica em movimento tem aumentado o interesse pela propulsão elétrica para os automóveis nos últimos anos. As novas tecnologias de armazenamento de energia elétrica viabilizaram o VE como meio de transporte para os centros urbanos. Os processos de modelagem, simulação e testes são partes importantes de um projeto de engenharia, especialmente um de grandes proporções.

Veículos elétricos são veículos automotores que utilizam pelo menos um motor elétrico para sua tração. Dentre os VE estão: os veículos elétricos a bateria (VEBs), híbridos (VEHs) e de célula a combustível (VECaCs).

A principal motivação no desenvolvimento de VEs está relacionada à busca por fontes de energia que sejam menos poluentes e dependentes de petróleo do que os motores de combustão interna (MCI) atuais. Veículos elétricos são um meio de transporte urbano com emissão zero, além de serem movidos a uma fonte de energia mais eficiente e que podem ser alcançadas através de diferentes fontes.

Ultimamente, o interesse pelo aprimoramento e comercialização de veículos elétricos vem se destacando no mercado, tanto nacional quanto internacional.

De acordo com o IEA (*International Energy Agency*), o Brasil tem grande chance de conseguir acompanhar o desenvolvimento das tecnologias ligadas ao carro elétrico, e este pode abrir uma janela de oportunidades. O país possui uma indústria automobilística consolidada e um mercado consumidor ávido por novas tecnologias.

Apesar de ser uma grande mudança que causará um grande impacto aos fornecedores e a cadeia de manutenção, pois o modelo totalmente elétrico passa a não consumir mais combustível fóssil, será de grande importância para a diminuição da poluição nos centros urbanos possibilitando a diminuição de emissão de dióxido de carbono na atmosfera.

Um dos problemas associados aos veículos elétricos é a sua relativa baixa autonomia quando alimentado apenas por baterias. Além disso, especialmente nos centros urbanos, a quantidade de procedimentos de aceleração e de frenagem é muito grande, o que demanda picos de potência da fonte. Sabe-se que um melhor desempenho das baterias, em termos de rendimento e de tempo de vida exige que tais picos sejam limitados.

O veículo elétrico que iremos modelar teve como base o projeto em andamento da Equipe Fórmula-E SAE/Brasil, formado por um grupo multidisciplinar de alunos dos cursos de graduação em Engenharia da UFPB. O projeto para a modelagem do veículo elétrico foi dividido em cinco módulos principais, representado na Figura 2.4, sendo eles: bateria (1), módulo de controle (2), motor elétrico (3), transmissão (4) e freio regenerativo (5). Nas seguintes seções estes módulos serão abordados com maiores detalhes com o intuito de definir características e propriedades úteis para a construção do modelo.

Figura 2.4 – Modelo do veículo elétrico



Fonte: (OLIVEIRA)

2.6.1. Bateria

A bateria é um elemento fundamental no desenvolvimento e comercialização do VE. Uma bateria típica é composta por duas ou mais células eletroquímicas unidas entre si. Ela converte a energia química armazenada em energia elétrica. Uma célula de bateria é composta por um eletrodo negativo e um eletrodo positivo que estão conectados por um eletrólito. A reação química entre os eletrodos e o eletrólito gera eletricidade.

As baterias recarregáveis podem inverter a reação química por inversão da corrente. O tipo de material utilizado para os eletrodos e os eletrólitos determina as especificações da bateria. Esta possui três características básicas: quantidade de energia armazenada na bateria por unidade de massa, potência fornecida por unidade de massa, e tempo de vida útil, correspondente ao número de ciclos de carga/descarga que ela pode sofrer.

A bateria é um componente fundamental em VEs, principalmente em veículos elétricos puros, ela constitui sua única fonte de energia. Além disso, para qualquer tipo ou tamanho, o banco de baterias permite o aproveitamento de energia de frenagem.

As células da bateria têm uma tensão relativamente baixa e uma capacidade limitada, por isso, estas células são agrupadas em série ou em paralelo com o objetivo de aumentar a tensão total e a corrente máxima a um nível utilizável. Devido à quantidade de baterias temos um grande aumento no peso nos VE.

Outros fatores que influenciam na capacidade e eficiência de uma bateria são sua temperatura de operação, geometria, ciclos de trabalho e auto descarga.

Existem basicamente duas categorias de baterias. As primárias que são aquelas que não podem ser recarregadas e produzem a sua energia a partir de uma reação eletroquímica, geralmente irreversível, o que as inutiliza. E as secundárias que são aquelas que passam pelo processo de carga e descarga inúmeras vezes.

Atualmente as baterias de chumbo-ácido, níquel-metal-hidreto (NiMH) e lítion-íon tem sido utilizadas nos veículos elétricos. As baterias de Lítio-íon são atualmente as mais utilizadas para o armazenamento de energia.

2.6.1.1. Bateria de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são utilizadas desde os primeiros carros elétricos na década de 90 e foi bastante difundida no meio automotivo. Ela foi muito utilizada nos primeiros veículos elétricos e híbridos construídos na década de 90, nesta época as baterias

pesavam cerca de 600 Kg e possuíam uma autonomia de aproximadamente 100 quilômetros. Este tipo de bateria não vem sendo indicada atualmente para aplicações nos novos VE, devido a sua robustez, entretanto alguns fabricantes defendem o seu uso pelo fato de seu custo ser reduzido diante de outras tecnologias e pelo seu contínuo desenvolvimento, que garante boas características.

2.6.1.2. Níquel Cádmio

As baterias de níquel cádmio (NiCd) surgiram em torno de 1900 porém só começou sua produção em massa cerca de 60 anos mais tarde. O cátodo é feito de hidróxido de níquel enquanto o anodo de cádmio, com hidróxido de potássio como eletrólito. Normalmente são encontradas com densidades de potência de 45 até 80 Wh/Kg e tem como principal característica o tamanho reduzido e sua alta capacidade de fornecimento de energia, sendo bastante utilizada em equipamentos portáteis. Este tipo de bateria tem algumas desvantagens, como por exemplo, o fato de se autodescarregar, cerca de 20% ao mês, além de apresentar o efeito memória (IMBASCIATI,2012).

2.6.1.3. Níquel Metal Hidreto

É uma evolução das baterias de NiCd, sua principal diferença consiste na substituição do cádmio pelo metal hidreto, permitindo que esse tipo de bateria seja totalmente reciclável. Apesar de um aumento em densidade de potência com valores de cerca 120 Wh/Kg e produzir raríssimo efeito memória ela apresenta uma alta taxa de autodescarga, aproximadamente 30% por mês. O Toyota Prius é um carro que utiliza esse tipo de bateria.

2.6.1.4. Lítio-Íon

Essas baterias possuem densidade de potência com valores em torno de 200 Wh/Kg e são baterias que exigem baixa manutenção além de apresentar uma excelente taxa de autodescarga, aproximadamente 10% ao mês. Contudo sofre com superaquecimento, exigindo que um sistema de controle eletrônico fosse desenvolvido especialmente para contornar esse problema, garantindo um correto carregamento e uso da bateria (IMBASCIATI,2012).

2.6.1.5. Densidade de Energia

Definido como sendo a quantidade de energia armazenada por unidade de volume e é normalmente denotada em termos de Wh/Kg. A densidade de energia é um parâmetro importante, pois através dela é possível calcular o tamanho necessário a uma bateria em função da capacidade energética desejada.

2.6.1.6. Eficiência Energética

A eficiência de uma bateria esta associada à quantidade de energia que ele é capaz de fornecer com relação a energia utilizada para carregá-la. Idealmente, a bateria deveria ser capaz de devolver toda a energia que lhe foi fornecida ao ser carregada, contudo isso nunca ocorre devido a eficiência da bateria.

A eficiência de uma bateria varia de acordo com a temperatura de operação, a taxa de carga, o tipo de bateria e, ainda, em função do estado de carga da mesma.

2.6.2. Modulo de Controle

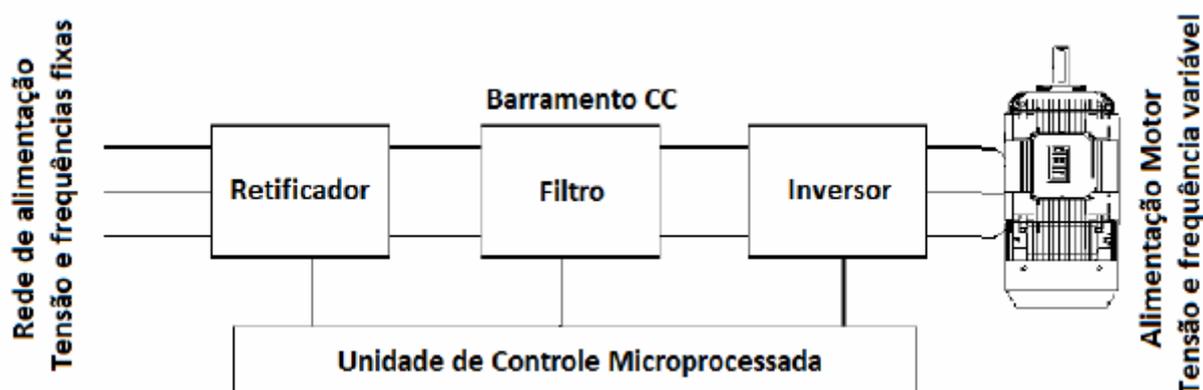
O controle de sistemas automáticos complexos tipicamente requer uma hierarquia de múltiplos níveis de controladores, desde servomecanismos, no nível inferior de hierarquia, até programas de *softwares* que programam o controle lógico necessário. As realimentações nos níveis inferiores da hierarquia são baseadas em representações de sistemas dinâmicos com variáveis contínuas, mas em um nível superior, uma visão em sistemas a eventos discretos é normalmente mais adequada para lidar com situações como acionamento e desligamento de um sistema, mudança de operação, diagnóstico de falhas e etc.

Um dos meios mais usuais para o controle de um motor elétrico é utilizar um inversor de frequência. Sua principal função é a partir de uma alimentação com frequência fixa prover à carga uma alimentação ajustável.

A entrada do inversor deve ser conectada à fonte de energia, bateria, e sua saída será conectada à carga acionada, sendo possível controlar a frequência, tensão e corrente. Com esse tipo de controle é possível ajustar a velocidade e o torque do motor (BARRETO,1986).

É apresentado na Figura 2.5 o diagrama de blocos de um inversor de frequência.

Figura 2.5 – Diagrama de blocos do inversor



Fonte: (Wesley SANTOS,2008)

O retificador converte as tensões alternadas da rede trifásica em tensões retificadas, o filtro é responsável por transformar estas tensões retificadas em tensão contínua. É possível verificar que apesar de se considerar a tensão contínua na saída do filtro, existe uma pequena oscilação na tensão, conhecida como *ripple* do capacitor. Quanto maior a capacitância, maiores serão os tempos de carga e descarga do capacitor, e conseqüentemente, menor será a oscilação. O estágio de inversão é responsável pela reconstrução das tensões alternadas trifásicas, contudo, estas tensões não possuem, necessariamente, as mesmas amplitudes e frequências das tensões da fonte de alimentação do inversor. É possível variar a tensão e a frequência aplicadas à carga.

2.6.3. Motor elétrico

É o sistema que disponibiliza trabalho mecânico para o veículo. Apresenta diferentes tipos de funcionamento, como combustão interna, elétrico e híbrido. O motor mais utilizado ainda é o de combustão interna, que converte a energia química contida nos combustíveis em calor e este em mecânico.

Com o aumento das campanhas em favor da diminuição da poluição e necessidade de maior eficiência energética, nos últimos anos o motor apresentou uma ampla gama de pesquisas e novas tecnologias.

Nos motores elétricos (ME), o limite mínimo de rotação de funcionamento não existe, pois, dependendo do seu tipo de construção, são capazes de fornecer torque mesmo à rotação nula. Esta condição permite eliminar a necessidade da transmissão de múltiplas

velocidades ou reduzi-la a um número menor de velocidades em comparação com uma transmissão para o MCI (NOCE,2010).

Atualmente, existem três alternativas principais de motores que estão sendo considerados para a aplicação de VE e VEH: o motor de relutância variável, o motor síncrono de ímãs permanentes e o motor de indução.

Os motores de relutância são interessantes para aplicações de propulsão elétrica por sua construção robusta, controle relativamente simples e habilidade de operação em altas velocidades. Entretanto, o motor possui um alto torque de *ripple* e o ruído acústico, fazendo-se necessário uma topologia especial do conversor.

Os motores de ímãs permanentes é atualmente a opção mais comumente utilizada no projeto de VE, principalmente o motor CC sem escovas. Decorrente de suas altas densidades de torque e de potência, especialmente quando são utilizados ímãs de alta densidade de fluxo magnético. Contudo, estes motores têm uma curta capacidade de enfraquecimento de campo, própria do campo magnético fixo dos ímãs, que não permite alongar a faixa de potência constante de forma representativa.

O motor de indução é considerado como candidato a propulsão de VE e VEH devido a sua confiabilidade, robustez, baixa manutenção, baixo custo e sua habilidade para operar em ambientes hostis (RUEDA,2014).

Como o projeto base deste veículo elétrico, foi o projeto em andamento da Equipe Fórmula-E SAE/Brasil, podemos apresentar o tipo de motor utilizado, e a partir dele construir um modelo para o nosso sistema.

O motor usado é do tipo Fluxo Axial – YASA-750. Para esta aplicação ele se destaca perante outros modelos por utilizar a tecnologia *Direct Drive*, que se trata de uma tecnologia de uso crescente para aplicações em robótica, tração elétrica e maquinarias em geral.

2.6.4. Transmissão

O sistema de transmissão tem como objetivo transmitir a potência mecânica do motor para as rodas, geralmente é composto pelo câmbio e diferencial. As relações de transmissão do sistema devem ser projetadas para adaptar-se ao torque fornecido pelo motor e à força de tração requerida para o movimento, ou seja, ele é responsável por adequar as curvas de desempenho do motor às necessidades do veículo (BOSCH,2005).

Todo veículo necessita de um sistema de transmissão, no entanto sua arquitetura depende de diversos fatores, dentre eles o *layout* do veículo, como posição do sistema de propulsão e tipo de tração e sua aplicação, veículo de passeio, *off-road*, transporte de carga ou embarcações, por exemplo.

2.6.5. Freio Regenerativo

O sistema de freios permite ao motorista, com atuação progressiva, reduzir à velocidade ou levar o veículo a imobilidade. Seu princípio de funcionamento é o atrito entre as pastilhas de freio e os discos, ou entre as sapatas e os tambores de freio, que geram as forças de frenagem necessárias para desacelerar o veículo, dissipando essa energia cinética na forma de calor (BOSCH,2005).

Sendo um item de segurança indispensável para qualquer veículo, os avanços tecnológicos de materiais e eletrônica vêm se aderindo cada vez mais neste sistema.

Uma forma de utilizar o sistema de freios é através do uso de frenagem regenerativa que tem como objetivo a recuperação da energia cinética e a diminuição do desgaste dos freios mecânicos. Em um veículo elétrico a redução de velocidade normalmente faz a máquina elétrica passar a operar como gerador, havendo um retorno de energia para as fontes, dependendo da topologia e do comando aplicado ao conversor eletrônico de potência (PAREDES, 2012).

Os conversores são bidirecionais em corrente e fazem a adequação dos níveis de tensão das fontes ao barramento que alimenta o conversor que aciona o motor. Os supercapacitores se caracterizam pela capacidade de suprir elevados picos de potência, ou seja, suportar elevadas correntes. No entanto, a energia acumulada é baixa, em comparação com as baterias. O uso concomitante de ambas as fontes para melhor desempenho de um VE é de suma importância.

A potência necessária para a aceleração de um veículo é menor que para a frenagem, pelo simples fato de que o projeto de um veículo pressupõe certa variação de velocidade em um dado intervalo de tempo. O processo de frenagem, por sua vez, pode ser requisitado em um intervalo de tempo muito menor, o que implica em um pico de potência mais elevado. Quando a frenagem é puramente mecânica, a energia retirada da massa em movimento se converte em calor. Na frenagem regenerativa essa energia reflui para os conversores e fontes.

No caso de um VE, o motor é também dimensionado para o processo de aceleração e de cruzeiro. Durante a frenagem possivelmente operará em sobrecarga.

2.7. Formula SAE

A SAE (Society of Automotive Engineers) é uma sociedade criada pela cooperação mútua de vários engenheiros e técnicos da área automotiva norte americana com o intuito de padronizar e qualificar as práticas de desenvolvimento e produtos de engenharia. Ela é hoje a sociedade que mais possui e fornece documentação técnica para as áreas de engenharia.

No meio acadêmico a SAE promove uma competição estudantil que visa à produção de veículos com finalidades distintas, essas competições ocorrem de nível regional a internacional. Elas buscam o desenvolvimento dos alunos através da criação e execução de projetos de alguns tipos de meios de transporte, com o SAE *Clean Snowmobile Challenge*®, veículos para neve, SAE *Supermileage Competition*®, Baja SAE® Series e Formula SAE® Series, este último também inclui uma categoria para híbridos, e na área aeronáutica, com o SAE *Aero Design*® Series. Dessas categorias somente as três últimas foram desenvolvidas no Brasil (SILVA,2015).

A competição teve início nos Estados Unidos em 1981, substituindo uma versão anterior chamada Mini-Indy. A carência de engenheiros especializados em veículos de alto desempenho alavancou o surgimento da competição. Impulsionada pelas três grandes montadoras Americanas: General Motors, Ford e Chrysler; que viram nessa competição uma oportunidade única de garimpar novos engenheiros para suas empresas. Esse apoio se fortaleceu com o tempo e as empresas ficaram plenamente satisfeitas com os estudantes que eram contratados, tanto que, em algumas edições a competição ocorreu em seus próprios campos de prova. Com o passar dos anos, diversas empresas se uniram as “Três Grandes” e além de contratar alunos, ainda desenvolveram produtos específicos para a Fórmula SAE, como por exemplo, a Goodyear, que possui uma linha de pneus específica para essa categoria, e mais recentemente a Mahle, que construiu seu primeiro motor especialmente para a Fórmula SAE. No Brasil a 1ª competição do Fórmula SAE ocorreu no ano de 2004. A tendência da competição, como ocorre no exterior, é assumir um importante caráter educacional na formação e aprimoramento dos novos engenheiros, contribuindo de maneira significativa para sua formação profissional, capacitando-os na busca por soluções de problemas, trabalho em

equipe, desenvolvimento de fornecedores, planejamento e análise de custos, simulando o desenvolvimento de um novo produto desde o projeto até a fabricação e testes, tendo como estímulo a competição (SAE,2017).

O projeto para a competição Fórmula contempla a divisão da equipe para atender as questões estrutural, mecânica, elétrica, eletrônica, aerodinâmica e ergonômica, conforme previsto pela SAE. Esta possui regulamentos que definem parâmetros mínimos construtivos para validação do veículo, considerando a segurança da estrutura e funcionamento do dispositivo de segurança. A competição é composta por provas dinâmicas e estáticas e também pelo detalhamento do projeto. Estas avaliações indicam à equipe os problemas e os pontos de melhorias para projetos futuros, sendo a documentação parte fundamental para a evolução na competição.

O desenvolvimento de um produto deve atender critérios para dar o primeiro passo até sua comercialização e aceitação pelos usuários através dos valores culturais. A SAE na proposta da competição fórmula propõe esta dificuldade como problema a ser solucionado no projeto do carro. O projeto formula em todos os níveis de sua estrutura tem o compromisso comum de desenvolver peças com alto desempenho e qualidade construtiva dentro das limitações impostas.

O avanço na tecnologia automotiva visa proteger e auxiliar as pessoas. A participação de instituições no projeto SAE estimula os estudantes a buscar por técnicas não disponíveis para aprimorar esses conhecimentos. Buscando acompanhar o desenvolvimento das tecnologias ligadas ao carro elétrico o projeto Fórmula SAE na categoria elétrico proporciona o desenvolvimento de um grande acervo, sempre buscando analisar as tecnologias disponíveis de baterias e motores elétricos a fim da obtenção de um o menor custo e um melhor desempenho.

3. REDES DE PETRI

Historicamente o conceito das Redes de Petri (RdPs) foi originalmente apresentado por Carl Adam Petri em sua tese de doutorado, submetida em 1962, à Faculdade de Matemática e Física da Universidade Técnica de Darmstadt na Alemanha.

A RdP é uma ferramenta gráfica e matemática que consegue se adaptar a inúmeras aplicações, é uma técnica de modelagem e projeto de sistemas que permite representá-los graficamente. Como ferramenta gráfica, a Rede de Petri pode ser usada para a comunicação visual similarmente aos fluxogramas e diagramas de blocos. Como ferramenta matemática, é possível obter equações de estados, equações algébricas e outros modelos matemáticos para o estudo do comportamento de sistemas (SANTOS,2008).

Mais especificamente, as RdP modelam dois aspectos desses sistemas: os eventos e as condições, bem como as relações entre eles. Dentre as aplicações podemos citar a avaliação de desempenho, a análise e verificação em sistemas discretos, os protocolos de comunicação, o controle de oficinas de fabricação, os sistemas de informação, entre outros (CARDOSO,1997).

A análise da RdP permite avaliar a estrutura e o comportamento dinâmico do sistema modelado. O resultado pode levar a melhorias ou mudanças no sistema.

Derivada da Teoria de Grafos e da representação dos autômatos finitos, a Rede de Petri também se aplica à otimização, análise e validação de sistemas, fornecendo, portanto, suporte às várias atividades essenciais no estudo de sistemas dinâmicos a eventos discretos.

Para entendermos esse modelo precisamos compreender alguns conceitos.

3.1. Noções básicas

Na modelagem de um sistema baseado numa abordagem por eventos discretos consideramos os seguintes conceitos básicos:

- Eventos: são os instantes de observação e de mudança de estado do sistema;

- Atividades: são os meios pelos quais pode-se recuperar e esconder as informações sobre a evolução do sistema físico entre dois eventos;
- Processos: são as sequencias de eventos e atividades interdependentes.

A evolução dos processos num sistema pode acontecer de forma simultânea ou não. Esta independência relativa significa que certas atividades são totalmente independentes entre si, enquanto que outras necessitam de pontos comuns. Existem diferentes formas de interação entre os processos: cooperação, competição, pseudo-paralelismo e paralelismo verdadeiro.

3.2. Máquina de estados finitos

A representação clássica de um sistema a eventos discretos, em que o número de estados é finito, consiste em enumerar todos os estados possíveis e descrever os eventos do tipo mudanças de estado, ou seja, descrever cada estado a partir do estado anterior.

$$M = (E, A, \theta, E_0) \quad (1)$$

O modelo matemático representado pela equação (2.1) é chamado de máquina de estados finitos e é composto por um conjunto finito de estados E com um estado inicial E_0 , um alfabeto de entrada A e uma função de transição de estado $\theta: E \times A \rightarrow E$ que associa a cada par estado – entrada o próximo estado.

Este modelo exprime bem a noção de evento, e parcialmente a de atividade, um estado entre dois eventos. Contudo, ele não exprime a noção de processo como a evolução simultânea de diversos processos paralelos. Uma máquina de estados finitos descreve apenas um único processo sequencial.

3.3. Processo de construção das Redes de Petri

O processo de construção de uma RdP envolve dois passos. Primeiro é definido o grafo da rede, ou seja, sua estrutura. Em seguida, é adicionado a esse grafo um estado inicial,

que consiste em um conjunto de estados marcados e uma função de rotulação de transições, resultando no modelo completo de uma Rede de Petri.

Um grafo de uma RdP tem dois tipos de nós, lugares e transições, e arcos que os conectam determinando a relação entre eles. Os arcos não podem conectar nós do mesmo tipo, isto é, eles só conectam os lugares às transições e as transições aos lugares.

A transição em um grafo de uma RdP representa eventos de um sistema a eventos discretos e os lugares caracterizam as condições sobre as quais esse evento pode ocorrer. Na RdP existe um mecanismo que indica as condições de cada transição, essas condições são definidas de peso do arco, representada por números próximos aos arcos, eles indicam a condição para que ocorra a transição. As fichas, representadas por pontos pretos desenhados dentro dos lugares, indicam em qual a posição inicial do sistema e ao longo de seu funcionamento, mostram em que posição o sistema está.

A dinâmica de transição de estados de uma RdP é representada pelo movimento das fichas entre os lugares. Essa mudança de posição modifica as marcações da rede e conseqüentemente seu estado.

Na modelagem de sistemas, geralmente os lugares são utilizados para representar uma condição ou situação se um componente, e as transições representam os eventos. Na Tabela 2.1 são apresentados significados usualmente utilizados para a representação de sistemas a eventos discretos (MONTEZANO, 2009).

Tabela 3.1 – Interpretações típicas de transições e lugares (MONTEZANO, 2009).

Lugares de Entrada	Transições	Lugares de Saída
Pré - condições	Eventos	Pós – Condições
Dados de Entrada	Etapa de Computação	Dados de Saída
Recursos Necessários	Tarefas ou Trabalhos	Recursos Liberados
Condições	Condição Lógica	Conclusão
Armazenadores (Buffers)	Processador	Armazenadores (Buffers)

3.3.1. Elementos básicos

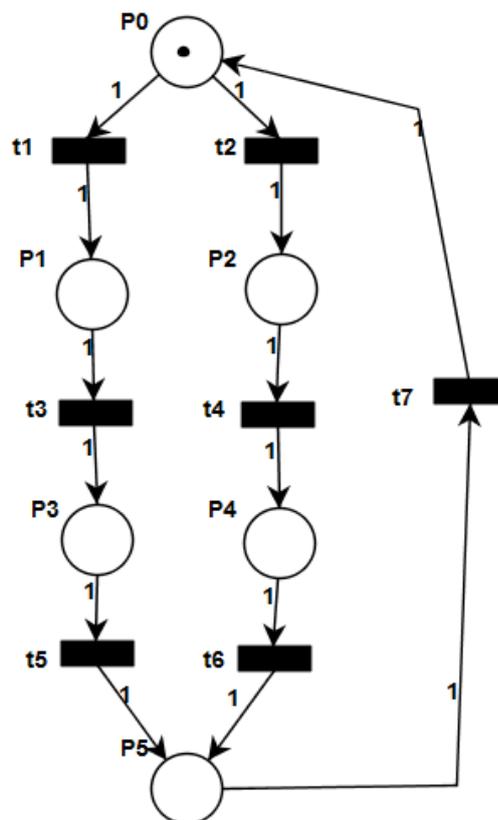
Os elementos básicos que permitem a definição de uma RdP são:

- Lugar (P): representado por um círculo, pode ser interpretado como uma condição, um estado parcial, uma espera, um procedimento, etc.

- Transição (t): representada por uma barra ou retângulo, é associada a um evento que ocorre no sistema.
- Ficha (•): representado por um ponto num lugar, é um indicador significando que a condição associada ao lugar é verificada.

A Figura 3.1 mostra um exemplo de um modelo de RdP constituída de lugares, transições, arcos dirigidos e marcações iniciais.

Figura 3.1 – Redes de Petri



Fonte: Autora

Utilizando os componentes citados, é possível representar um sistema de maneira estática e também podem ser simuladas atividades concorrentes e dinâmicas por meio do uso de marcações (MURATA,1989).

O estado do sistema é dado pela repartição de fichas nos lugares da RdP, cada lugar representando um estado parcial do sistema. A cada evento que ocorre no sistema é associada uma transição no modelo de RdP. A ocorrência de um evento no sistema é representado, no modelo, pelo disparo da transição ao qual esta associado.

Uma transição pode disparar se estiver habilitada. Uma transição está habilitada se cada um dos seus lugares de entrada tem, pelo menos, a quantidade mínima de fichas necessária para aquele arco, peso.

O disparo de uma transição é formado por duas operações: instantâneas e indivisíveis:

- Retirar as fichas dos lugares de entrada, indicando que esta condição não é mais verdadeira após a ocorrência do evento.
- Colocar fichas em cada lugar de saída, indicando que estas atividades estarão, após a ocorrência do evento, sendo executadas.

O disparo de uma transição muda a marcação da RdP para uma nova marcação. O disparo de transições continua enquanto existir, pelo menos, uma transição habilitada. Quando não há transições habilitadas, a execução para. O estado de uma RdP é definido por sua marcação.

Devido a sua formalização matemática, as RdP permitem a utilização de equações e técnicas rígidas que possibilitam a caracterização do comportamento de sistemas. Isso pode ser feito de maneira simplificada ou aprofundada, isto é, o modelo pode ser muito realista, muito abstrato ou ainda um meio termo (MURATA,1989).

A utilização de abordagens de visualização diferentes para modelos de RdP também são úteis em determinadas situações. Utilizar o modelo gráfico para produzir um algoritmo, por exemplo, pode se tornar complexo por exigir um grande esforço computacional e, para atenuar esse efeito, existem outras formas de se representar a rede, como, por exemplo, em forma matricial (MURATA,1989).

Essa abordagem permite que os lugares sejam dispostos em forma de linhas, as transições como colunas e os números que preenchem a matriz representam os arcos que interligam lugares e transições. O estudo desenvolvido por Murata trata de representar os modelos de RdP por meio de matrizes como uma alternativa aos modelos que utilizam representações gráficas. A partir desta representação, a implementação de um algoritmo pode se tornar mais simples, fazendo com que as operações sejam realizadas em forma matricial.

A matriz principal do modelo é chamada matriz de incidência. A Figura 3.2 representa a mesma RdP da Figura 3.1, contudo, utilizando uma representação matricial.

Figura 3.2 – Representação Matricial da RdP da Figura 3.1

$$A = \begin{matrix} & t1 & t2 & t3 & t4 & t5 & t6 & t7 \\ \begin{matrix} P0 \\ P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

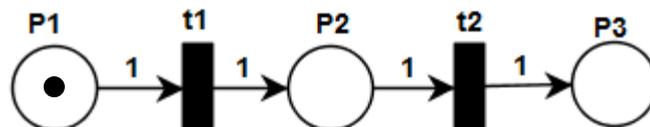
Fonte: Autora

Como já mencionado anteriormente, os processos podem evoluir em cooperação, em competição e em paralelo. Além destes, os processos podem ainda evoluir em sequencia, de forma repetida, entre outros. As RdPs serão modeladas utilizando estas diferentes interações.

1. Sequência

A estrutura dos encadeamentos de eventos e atividades do processo é dada de forma ordenada sem divisão.

Figura 3.3 – Sequência de processos



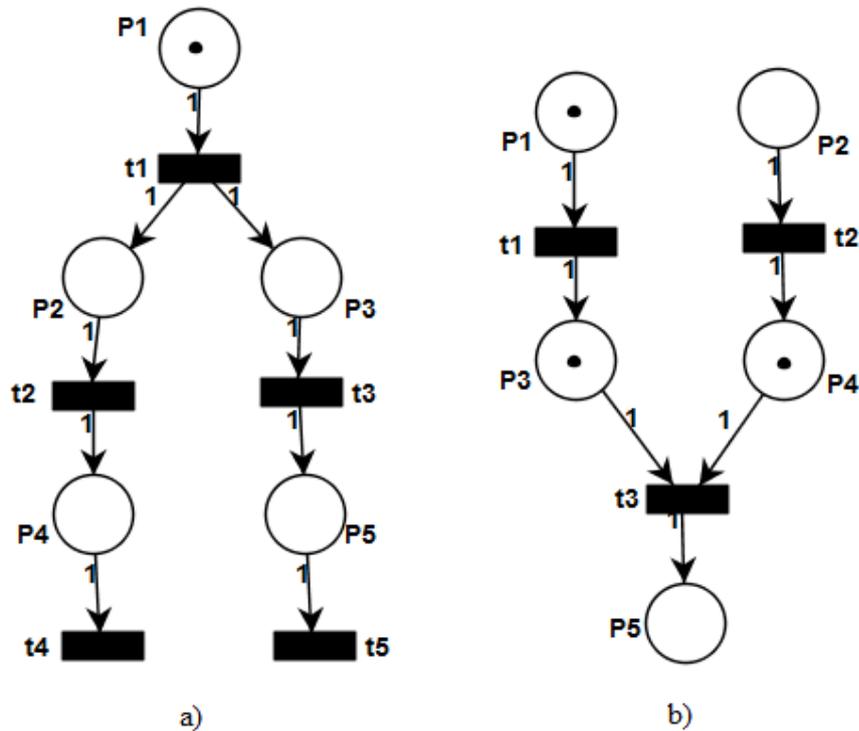
Fonte: Autora

Podemos descrever a partir da Figura 3.3 um processo de fabricação, em que P_1 , P_2 e P_3 são os lugares e representam as diferentes fases da construção da peça, de modo sequencial. As transições t_1 e t_2 descrevem os eventos de passagem de uma fase a outra e as fichas correspondem as peças. Uma peça está sendo usinada em P_1 , enquanto que uma outra peça que já passou pela fase P_1 e P_2 está terminando a fabricação em P_3 .

2. Evoluções síncronas e assíncronas

A partir da estrutura dos encadeamentos sequenciais podemos descrever um procedimento de divisão ou junção.

Figura 3.4 – a) Divisão; b) Junção



Fonte: Autora

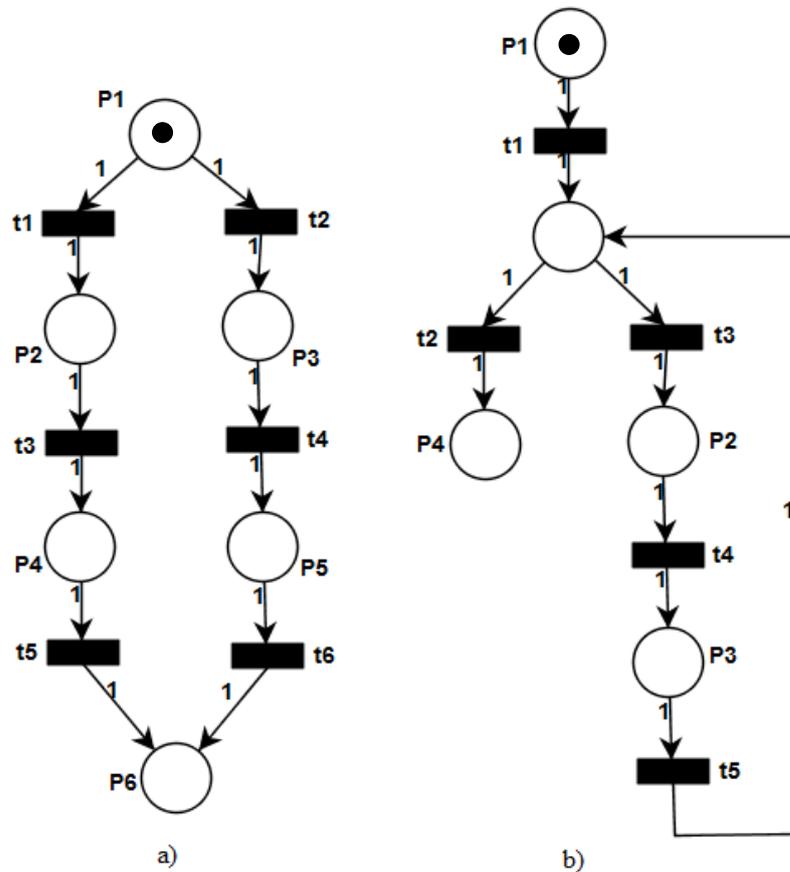
Na divisão Figura 3.4a, o fim da operação P_1 consiste em separar a peça, para este caso, em duas peças diferentes que iram continuar o processo de forma simultânea, de modo síncrono, sem a interferência da outra.

Já na junção Figura 3.4b, precisam ter as duas fichas, uma em P_2 e outra em P_4 para que ocorra a transição t_3 .

3. Variantes e caminhos alternativos

Um lugar com mais de um arco de saída corresponde ao início de um conjunto de caminhos alternativos e uma transição com mais de um arco de saída corresponde a uma divisão ou início de evoluções paralelas, como ilustrado na Figura 3.5a.

Figura 3.5 – a) Caminhos alternativos; b) Repetição



Fonte: Autora

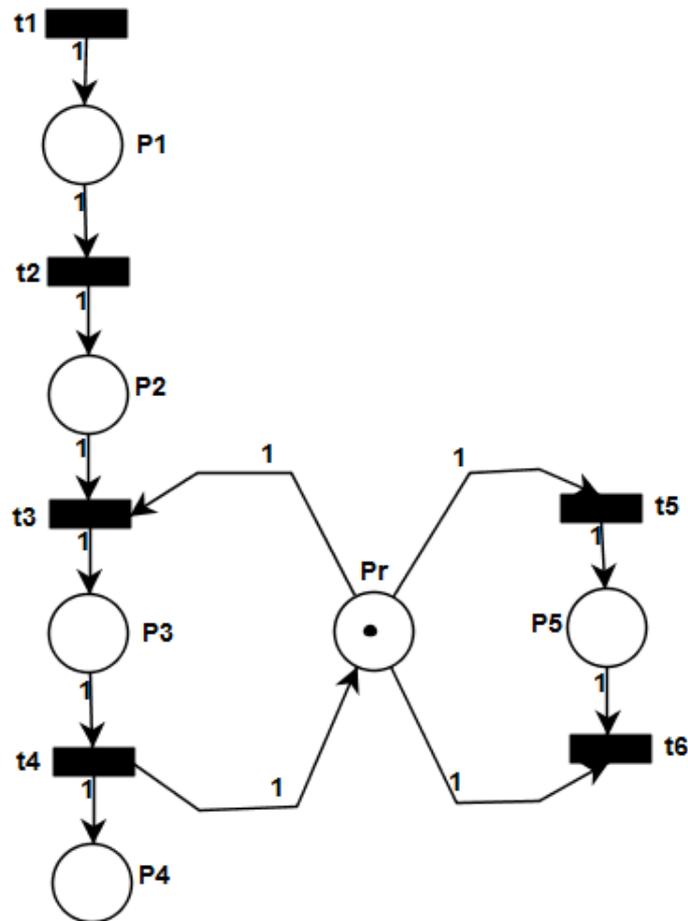
4. Repetição

Outro comportamento que é necessário modelar quando se deseja representar sistemas a eventos discretos é a repetição de uma atividade enquanto uma condição for verdadeira, como ilustrado na Figura 3.5b.

5. Alocação de recursos

A utilização e o partilhamento de recursos são um dos pontos mais importantes na modelagem de um sistema. A maioria das máquinas envolvidas no processo pode executar apenas uma atividade de cada vez, ou seja, uma vez ocupada só estará disponível para outra tarefa quando terminar a primeira, como ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Partilhamento de um recurso



Fonte: Autora

3.3.2. Propriedades da Rede de Petri

Murata (1989) cita que o mais importante nos modelos criados com RdPs é a capacidade de poder analisar propriedades e verificar problemas existentes nos sistemas modelado. Existem duas grandes classes de propriedades que podem ser verificadas: as propriedades comportamentais, dependentes das marcações iniciais, e as propriedades estruturais.

Existem oito principais propriedades comportamentais que podem ser verificadas em modelos de RdPs (MURATA,1989). São elas:

1. Alcançabilidade

O conceito de alcançabilidade é fundamental para o estudo de propriedades dinâmicas de sistemas. Disparos efetuados por transições habilitadas fazem com que

marcações fluam na rede, dessa forma, a distribuição de marcações muda com base nas regras de transição. Um estado é dito alcançável se existe uma sequência de disparos que fazer com que a partir de uma marcação M_o se torne uma marcação final M_n .

2. Delimitação

Uma RdP é dita delimitada ou limitada quando o número de marcações em cada lugar da rede não excede um número finito, para qualquer lugar que seja alcançável por meio de marcações iniciais.

3. Vivacidade

O conceito de vivacidade está intimamente ligado com a ausência de *deadlocks* em sistemas. Uma rede é considerada viva se qualquer estado possa ser alcançado por meio de M_0 , ou seja, a partir deste estado inicial é possível realizar uma sequência de disparos que atinja qualquer transição do modelo.

4. Reversibilidade

Uma RdP é reversível se, para cada marcação que estiver em algum ponto da rede, seja possível alcançar a situação de marcações iniciais.

5. Coberta

Considera-se que uma marcação M em uma rede (P_N, M_o) é coberta se existem marcações M' em $R(M_o)$ de maneira que $M'(p) \geq M(p)$ para qualquer lugar da rede.

6. Persistência

Em uma rede persistente, se em algum momento duas transições estão ativas, o disparo de uma das duas não desativa a outra, ou seja, se em algum momento uma transição for ativada ela não será desativada sem disparar.

7. Distância sincrônica

O conceito de distância sincrônica é fundamental para sistemas de condições, pois representa o grau de dependência mútua de dois eventos.

8. Equidade

Pode-se citar dois conceitos básicos de equidade em RdPs: equidade delimitada ou equidade incondicional. Em uma rede de equidade delimitada, para cada par de transições, uma pode disparar somente um número limitado de vezes enquanto a outra não dispara. Em uma rede de equidade incondicional, todas as sequências de disparo devem apresentar equidade incondicional.

3.3.3. Programas para Análise das Redes de Petri

Existem diversos programas que simulam e/ou analisam as redes de Petri dentre eles estão: HPSim, PIPE, ASPenN, PETRILab, SIMPETRI e JSARP.

Dentre os simuladores de rede de Petri o PIPE foi escolhido por se tratar de um programa gratuito, eficiente e de fácil utilização que permite analisar as redes de Petri através de suas principais características.

3.3.4. Vantagens da Utilização das Redes de Petri

As vantagens da utilização da RdP são:

- Pode-se descrever uma ordem parcial entre vários eventos, possibilitando a flexibilidade;
- Os estados, bem como os eventos, são representados explicitamente;
- Uma descrição precisa e formal das sincronizações torna-se possível, sendo essencial para alcançar-se a necessária segurança de funcionamento.

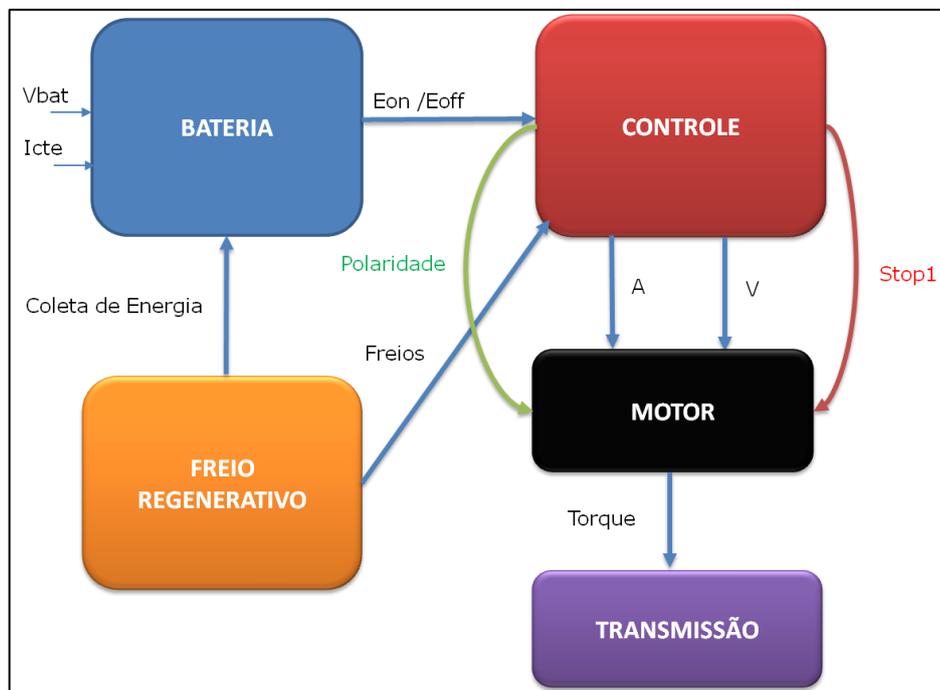
4. MODELAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO UTILIZANDO RDP

Neste capítulo será apresentada a modelagem do veículo utilizando redes de Petri. A partir dos conceitos de RDPs podemos modelar o sistema para análise do veículo elétrico. O sistema é baseado em um veículo elétrico urbano composto por cinco subsistemas que serão interconectados conforme ilustrado na Figura 2.4.

A construção da RDP utiliza o método de composição modular, que consiste na criação de grafos com lugares e transições. Para a realização da modelagem o veículo elétrico apresentado foram criados os módulos, ilustrados na Figura 4.1, a figura tem como objetivo apresentar os subsistemas e suas interconexões mostrando algumas variáveis que serão importantes para o estudo e simplificação do modelo, com a finalidade de estabelecer subsídios para o entendimento da dinâmica do sistema.

A principal característica em um problema de modelagem está na presença de eventos concorrentes e assíncronos que devem ser considerados e formalizados corretamente.

Figura 4.1 – Interconexões entre Módulos



Fonte: Autora

4.1. Bateria

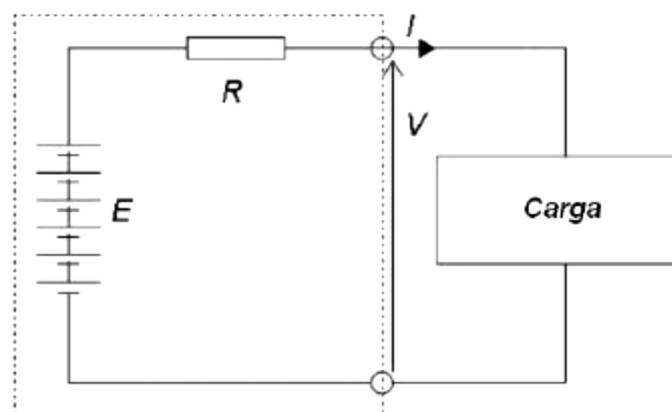
As baterias, como já mencionado, são elementos compostos por duas ou mais células que convertem energia química em energia elétrica. Dentre as características de uma bateria devem que devem ser consideradas em um projeto de um veículo elétrico, pode-se ressaltar suas tensões típicas e capacidade de carga além de outros fatores, tais como: taxa de descarga, temperatura de operação e quantidade de ciclos de trabalho (REVOREDO,2007). Os principais parâmetros serão apresentados a seguir.

4.1.1. Tensão

É possível representar a bateria de maneira simplificada, como mostrado na Figura 4.2, em que E representa a tensão de circuito aberto, R a resistência interna e V a tensão entre os terminais da bateria.

É possível observar que a tensão nos terminais não é constante, ela varia de acordo com a corrente elétrica solicitada. A resistência interna modela a perda associada ao aumento da corrente entre os terminais da bateria.

Figura 4.2 – Circuito elétrico simplificado equivalente de uma bateria



Fonte: (REVOREDO,2007)

4.1.2. Capacidade de carga

A capacidade de carga de uma bateria é normalmente definida em termos de Ampères-hora (Ah). A quantidade de Ampères-hora define o número de horas que uma bateria é capaz de fornecer um Ampère de corrente.

O tempo de descarga de uma bateria varia com relação a sua especificação em função da quantidade de corrente que lhe é solicitada. É apresentada na Tabela 4.1 a variação da tensão em relação ao estado de carga da bateria, ou seja, para a tensão de 12,65 V o estado de carga é de 100% (bateria totalmente carregada) e para a tensão 11,89V ou inferior a bateria é considerada com 0% (bateria descarregada).

Tabela 4.1 – Exemplo da relação entre OCV e SOC para uma bateria (OGAWA,2011).

Tensão de Circuito Aberto (OCV)	Estado de Carga (SOC)
12,65V	100%
12,45V	75%
12,24V	50%
12,06V	25%
11,89V ou menor	Descarregada

Geralmente os fabricantes especificam a capacidade de carga de uma bateria associada a um determinado tempo de descarga. Principalmente, no caso de baterias com grande capacidade de carga, tais como as utilizadas em VEs, é comum que elas sejam especificadas para um tempo de descarga de 6h. Por exemplo, se um fabricante afirma que uma bateria possui capacidade nominal de 24 Ah associada a seis horas de descarga, é o mesmo que dizer que a bateria é capaz de fornecer uma corrente $I = \frac{24}{6} = 4A$ ao longo de 6horas ininterruptamente. Ao termino deste período, a bateria estará completamente descarregada.

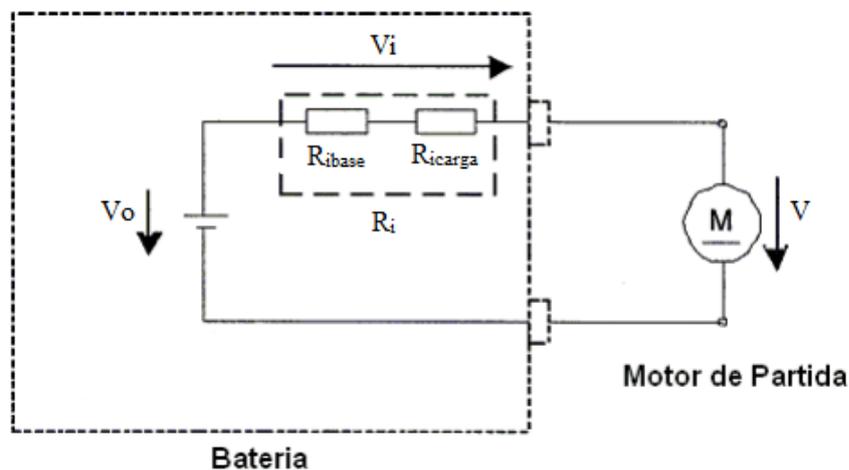
É importante para o projeto de veículos elétricos que seja possível prevê o tempo e a quantidade de descarga de um banco de baterias em função da corrente que lhe é solicitada pelo sistema.

4.1.3. Modelo da bateria

Existem estudos que apresentam possíveis modelos matemáticos que representam a dinâmica de funcionamento de uma bateria. O modelo deve representar a dinâmica da bateria nas condições de carga e descarga, esta última principalmente, sendo ela responsável pela condição na qual a bateria converte sua energia química em elétrica. Além disso, o modelo deve ter como base um circuito elétrico equivalente para que seja fácil seu entendimento.

É apresentado na Figura 4.3 o modelo do circuito equivalente para uma bateria.

Figura 4.3 – Modelo de circuito para a bateria



Fonte: (OGAWA,2011)

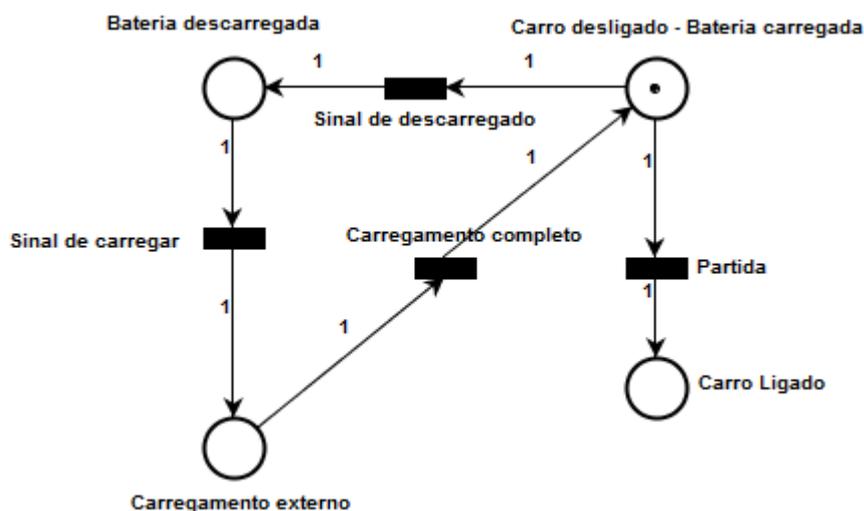
O modelo é genérico e dinâmico que representa os mais populares tipos de baterias recarregáveis (i.e., íon lítio, níquel cádmio, níquel metal hidreto e chumbo ácido). A partir do modelo para as baterias genéricas é possível construir um modelo em RdP para a bateria, visando verificar sua condição de carga e descarga a partir das variáveis de entrada e saída descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Variáveis de controle da bateria

Variável	Valores	Comportamento
Carga da bateria	$I \geq 20Ah$	Ligar (Bateria carregada)
	$I < 20Ah$	Impossibilitado de ligar (Recarregar bateria)
Atuadores	Tensão de carga 100%	Carregada
	Tensão de carga 0%	Descarregada

A corrente representa o limite máximo e mínimo necessário para a que uma transição ocorra. A tensão de carga, representado nas redes de Petri pelas transições, será monitorada por meio de atuadores que irão informar ao condutor o nível de carga da bateria.

Figura 4.4 – Módulo da bateria



Fonte: Autora

É apresentado na Figura 4.4 o módulo da bateria composto por três estados e quatro transições. A condição inicial adotada será a do carro ligado com a bateria carregada, após a utilização do veículo a bateria irá descarregar, quando esta situação ocorrer um sinal será ativado, este sinal representa a transição $t1$, Sinal de descarregou, fazendo com que o estado da “Bateria descarregada” seja ativado. Para a transição $t2$, Sinal para carregar, será ativado pelo condutor, este deverá conectar o veículo elétrico a uma fonte externa de energia, a partir deste ponto o carro estará no estado de “Carregamento externo”. Depois de completada a carga total do veículo uma luz indicará carga completa, passando pela transição $t3$, e mesmo que o carro ainda esteja conectado na energia o veículo se encontrará no estado inicial novamente, com o carro desligado e a bateria carregada.

4.2. Módulo de controle

O módulo de controle realiza a troca de informações entre os outros subsistemas, suas principais funções consistem em: controlar os procedimentos de inicialização e desligamento do veículo; calcula a força motriz do veículo de acordo com a operação do

condutor, aliando as condições da bateria e o estado do motor, para comandar através do inversor o torque de saída; calcular a melhor corrente de carga, estimar o tempo de carregamento e o consumo de eletricidade, visando a eficiência e autonomia do veículo; e monitora e diagnostica os sistemas do veículo elétrico para a proteção contra falhas.

Para o nosso modelo, o módulo de controle terá como variável de entrada a tensão proveniente do acelerador, determinando os comandos para aceleração do motor. O comportamento do sistema pode ser descrito pela Tabela 4.3.

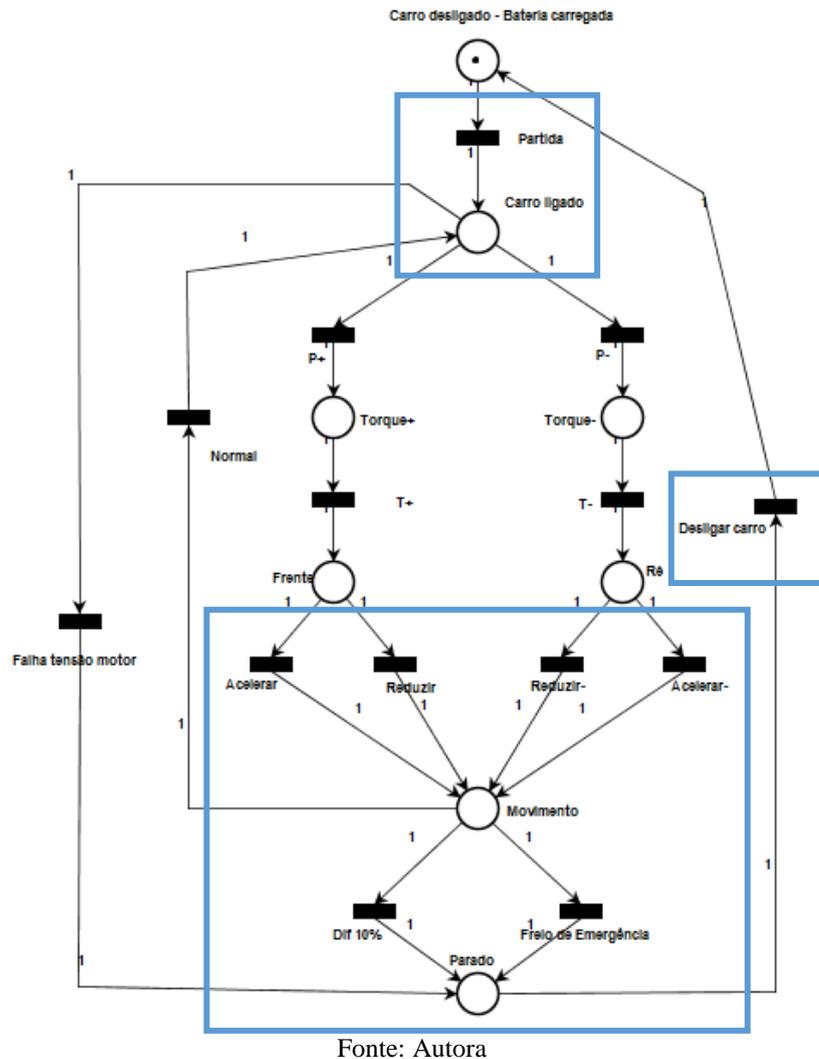
Tabela 4.3 – Variáveis de controle

Variável	Valores	Comportamento
Aceleração (A)	$A = \text{cte}$	Aumenta a velocidade
	$A = 0$	Não faz nada
Diferença de tensão (dT)	$dT > 10\%$	Parado por falha
	$dT < 10\%$	Padrão
Tensão do pedal (V)	$V = 0$	Parado
	$V = V_{\text{max}}/2$	Velocidade intermediária
	V_{max}	Velocidade máxima
Comando do sistema de freios	Freio normal = 0 / Freio de emergência = 0	Não faz nada
	Freio normal = 0 / Freio de emergência = 1	Parado por falha
	Freio normal = 1 / Freio de emergência = 0	Reduz velocidade
	Freio normal = 1 / Freio de emergência = 1	Parado por falha
Polaridade	Polaridade direta	Marcha frente
	Polaridade inversa	Marcha ré

É apresentado na Figura 4.4 o módulo de controle. Este módulo sozinho não possibilitaria uma análise, pois trataria apenas de variáveis soltas. Este módulo tem início após o módulo da Bateria, quando o carro é acionado, ou seja, quando a transição t_4 é disparada através do condutor. Com o veículo acionado é preciso definir qual o próximo movimento, para isto é preciso adquirir as informações das ações do condutor, o subsistema de controle irá receber as variáveis das mudanças dos estados da tensão, polaridade e corrente e a partir delas informar o torque de saída para o motor. Além de calcular o torque de saída o

módulo de controle é responsável por monitorar todos os outros subsistemas como prevenção de falhas, um dos dispositivos que atuam diretamente com o sistema de falhas é o freio, a partir da verificação da transição do freio de emergência é possível saber se ocorreu alguma falha no subsistema.

Figura 4.5 – Módulo de controle

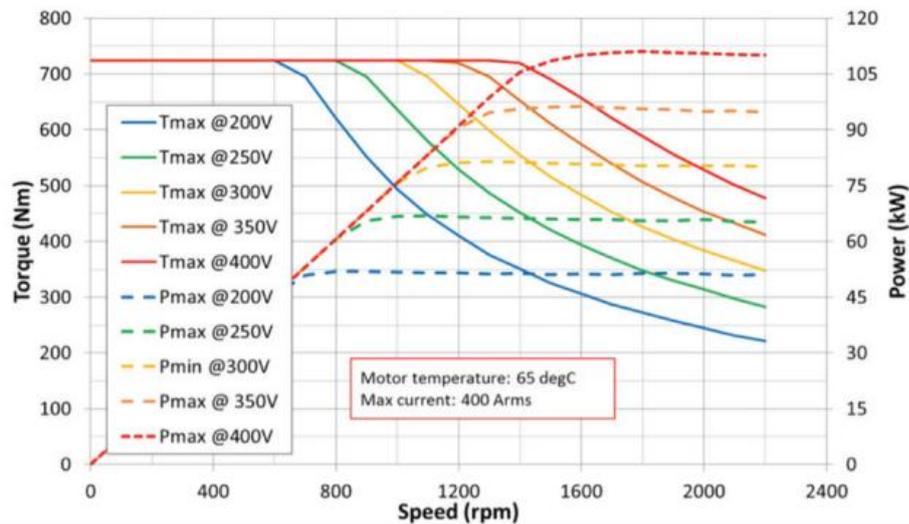


4.3. Motor elétrico

O motor que utilizaremos como base para o modelo será um motor do tipo Fluxo Axial – YASA-750. Ele é limitado a várias variáveis como: máximo torque, máxima tensão utilizada, máxima velocidade e etc. tais parâmetros foram utilizados para as definições de

variáveis usadas para a modelagem. Na Figura 4.6, podemos verificar a faixa de operação do motor relacionando-se o torque, potência e velocidade do motor.

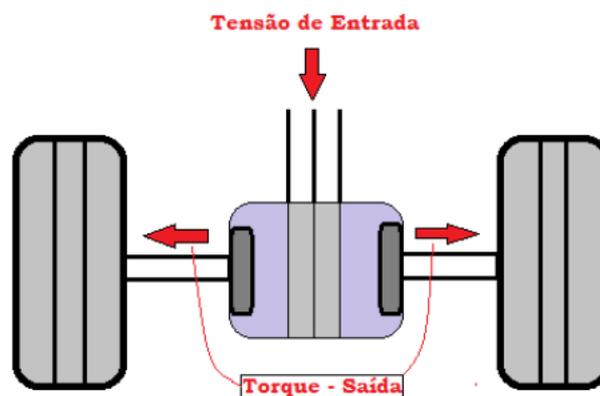
Figura 4.6 – Relação Torque x Velocidade (rpm) do motor YASA – 750



Fonte: (YASA)

O motor, em termos de variáveis discretas de entrada e saída, possui uma representação simplificada. A Tensão como parâmetro principal de entrada e como variável de saída o Torque, como pode ser observado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Variáveis de entrada e saída de um motor



Fonte: (Autora)

É possível perceber que o motor receberá a orientação de entrada e produzirá uma orientação de saída. Para obtermos o comportamento ordenado de direção precisaremos além de analisar a tensão verificar sua polaridade. Isto é, a saída será em função de uma entrada específica. Desta maneira, para cada variável modelada atribui-se diversos estados que estas podem assumir que serão as características responsáveis por representar a atual situação do motor. É apresentado na Tabela 4.4 as variáveis modeladas e o seu comportamento.

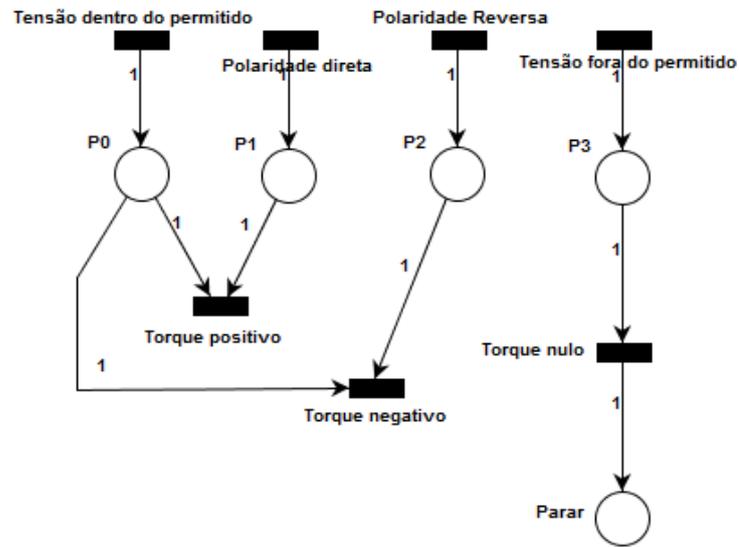
Tabela 4.4 – Variáveis do módulo do motor

Variável	Valores	Comportamento
Torque (saída do motor)	Abaixo de $T_{m\acute{a}x}$ (550Nm)	Aumentar tensão no pedal
	Acima de $T_{m\acute{a}x}$ (550Nm)	Diminuir tensão no pedal/ parar/ travar
Tensão na entrada do motor (saída do inversor)	Abaixo de $V_{m\acute{a}x}$ (300Vdc)	Aumentar ou manter pressionamento no pedal
	Acima de $V_{m\acute{a}x}$ (300Vdc)	Diminuir pressionamento.
Polaridade (saída do inversor)	Inversa	Motor visualiza sentido inverso
	Reversa	Motor visualiza sentido reverso

É apresentado na Figura 4.8 o módulo do motor. Seu principio tem como base a Figura 4.7, em que o motor recebe, através do módulo de controle, a tensão, dentro da faixa permitida, além da tensão também é necessário que a transição indicando a polaridade do motor seja acionada. Esses dois estados acionados indicaram a saída do motor, ou seja, o torque de saída. Caso a condição da tensão não seja válida, ou seja, não esteja dentro da faixa permitida, não ocorrerá movimento do carro, pois o torque será nulo.

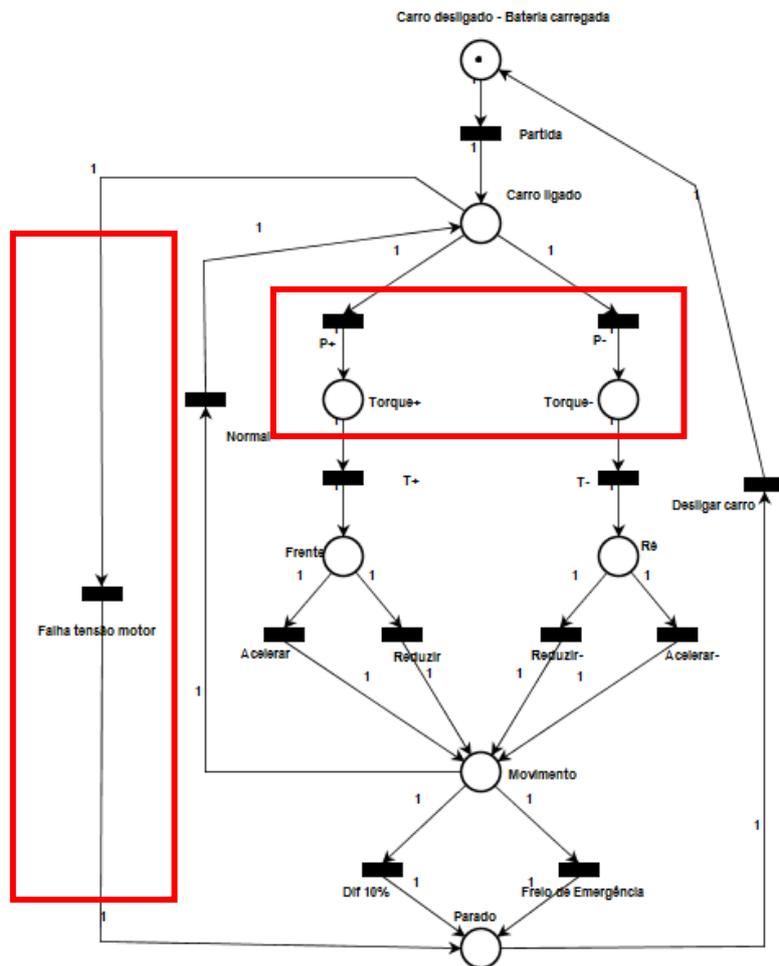
Outra forma de analisar o módulo do motor é quando ele já se encontra inserido no módulo de controle, como podemos observar na Figura 4.9, o módulo do motor está no centro do módulo de controle. Nesta representação as transições que antes determinavam as tensões e a polaridade estão condensadas em uma única transição representada por $P+$ e a saída é representada pelo torque de saída.

Figura 4.8 – Modelagem do motor



Fonte: Autora

Figura 4.9 – Transições e estados do módulo motor



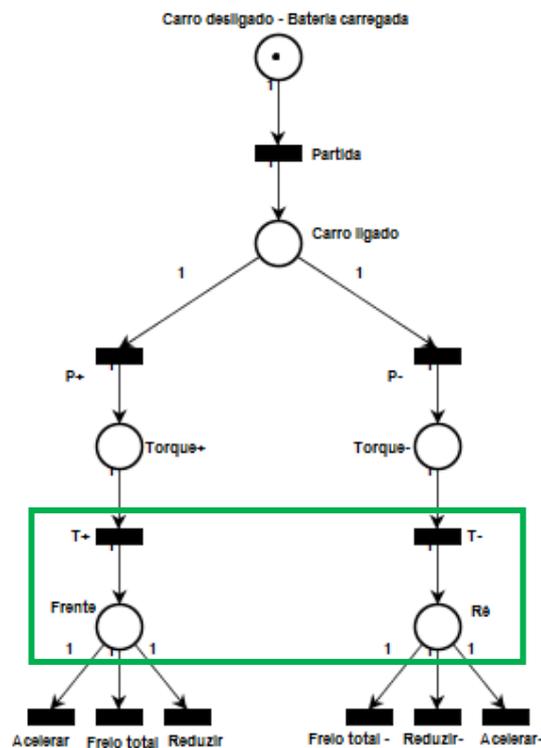
Fonte: Autora

4.4. Transmissão

O motor utilizado neste modelo é um motor *direct drive*, é um tipo de motor com acionamento direto, isto é, não necessita de grandes elementos de fixação ou de transformações de energia. Portanto, temos que, o sistema de transmissão se dará por meio de marcha única: frente e ré.

É apresentado na Figura 4.10 o módulo de transmissão, representando um motor *direct drive*. A transmissão é uma transição que tem como estado anterior o torque de saída do motor, a partir dele será informado o movimento do veículo, frente ou ré.

Figura 4.10 – Módulo da transmissão



Fonte: Autora

4.5. Freio regenerativo

O uso de frenagem regenerativa tem como objetivos a recuperação da energia cinética e a minimização do desgaste dos freios mecânicos. Em um VE, a redução da velocidade, normalmente, faz com que a máquina elétrica passe a operar como gerador, havendo um retorno de energia para as fontes (PAREDES,2012).

É apresentada na Figura 4.11 uma possível configuração para o sistema de frenagem regenerativa do veículo elétrico.

Figura 4.11 – Fluxo de potência no veículo na etapa da frenagem regenerativa



Fonte: (PAREDES,2012)

O modelo apresentado na Figura 4.11 ilustra a proposta para um sistema de frenagem que integra a frenagem elétrica regenerativa com o freio mecânico.

A potência requisitada para a aceleração de um veículo é muito menor que a potência requisitada para a frenagem, pois a aceleração pressupõe uma variação de velocidade em um dado intervalo de tempo, contudo o processo de frenagem, geralmente ocorre em um intervalo de tempo muito menor, provocando um pico de potência mais elevado.

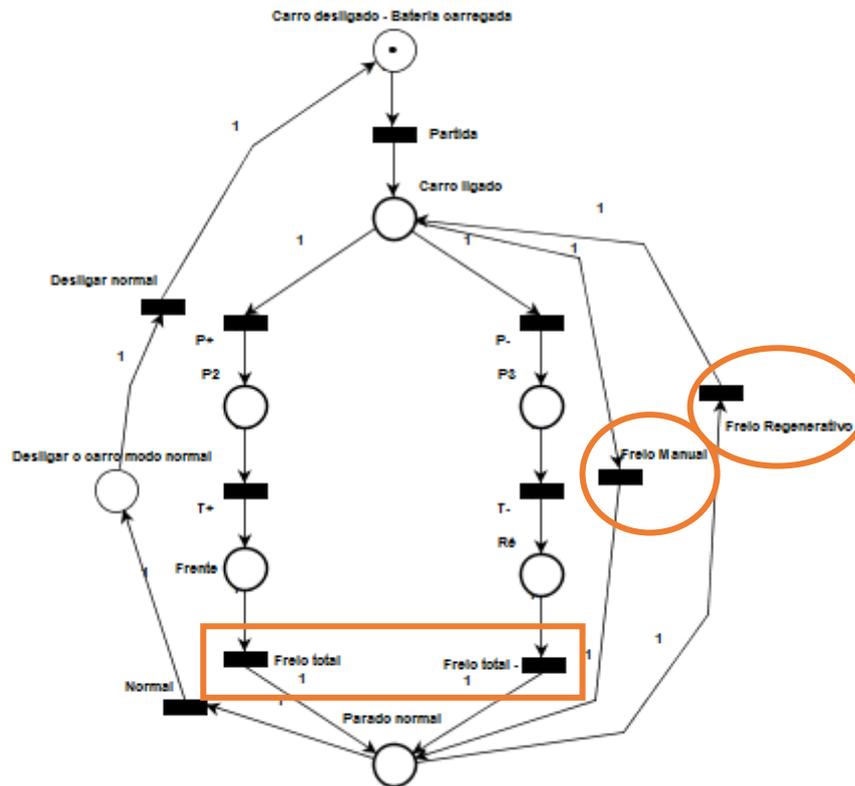
Na frenagem puramente mecânica, a energia retirada da massa em movimento converte-se em calor. Já na frenagem regenerativa essa energia reflui para os conversores e fontes. Durante a frenagem é possível que o sistema opere em sobrecarga. Usualmente a capacidade de suportar sobrecarga de um circuito eletrônico é menor que a de um dispositivo eletromagnético, portanto, sob o risco de destruição dos mesmos, faz-se necessário respeitar a capacidade de sobrecarga desses componentes.

Caso a aceleração demandada pelo condutor produza um valor de corrente que não seja suportável pelos conversores é preciso que seja acionado o freio mecânico. Há ainda a questão da segurança, caso o sistema elétrico não funcione adequadamente na frenagem (PAREDES,2012), podendo ser incluído um sistema de desligamento de emergência.

A partir da desaceleração demandada pelo condutor é gerado um comando para a redução da frequência do inversor, fazendo com que o motor opere como gerador. Caso a potência ou a corrente resultante seja excessiva para os conversores, um torque frenante adicional pode ser proporcionado pelo freio mecânico (PAREDES,2012).

Baseando-se no modelo descrito, podemos apresentar o módulo de frenagem como ilustrado na Figura 4.13. O módulo de frenagem é composto por três tipos de freios, o freio de pedal, transição “Freio Total” e “Freio Total-”, o freio manual e o freio regenerativo.

Figura 4.12 – Módulo do sistema de Frenagem



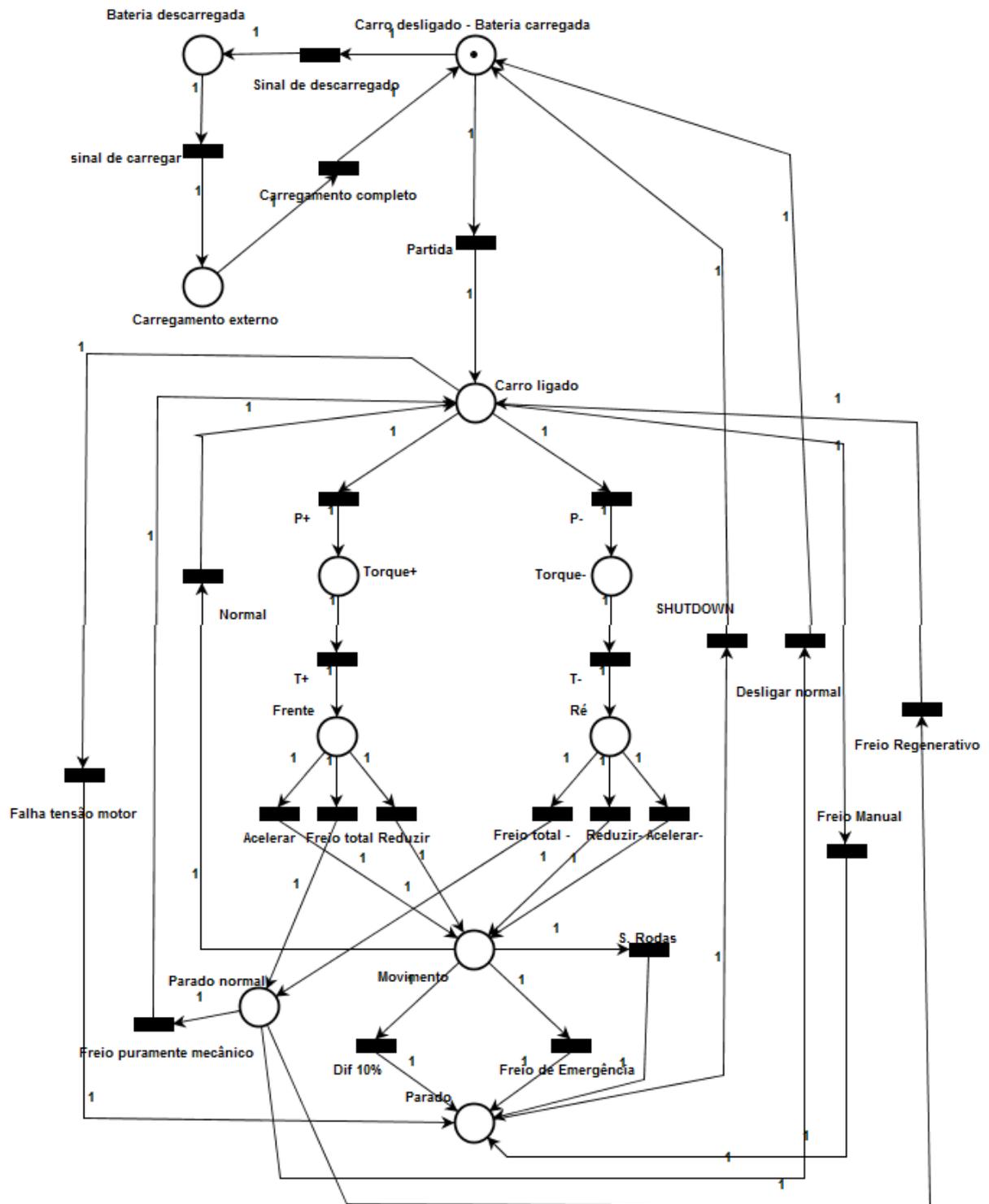
Fonte: Autora

O freio de pedal é responsável pelas transições realizadas, pelo condutor, durante o movimento do veículo. O freio manual é responsável pela transição realizada, pelo condutor, enquanto o veículo está parado, para manter o carro estável em terrenos com declives. O freio regenerativo é a transição responsável por levar a energia cinética acumulada à bateria. Para esta etapa a energia acumulada é levada a bateria a partir do estado do carro ligado.

4.6. Modelo completo do veículo elétrico

É necessário lembrar que apesar da divisão em módulos para a modelagem do sistema do veículo elétrico, o modelo deste é uma junção de todos os outros.

Figura 4.13 – Modelo completo do Veículo elétrico



Fonte: Autora

Observa-se na Figura 4.14 a integração em um único modelo dos módulos de bateria, controle, motor, transmissão e freio regenerativo os quais constituem os principais componentes do VE.

É apresentado na Tabela 4.5 os lugares e comportamentos da rede de Petri do modelo completo do veículo elétrico.

Tabela 4.5 – Definição dos estados da rede de Petri do modelo do veículo elétrico

Lugar (Estado)	Comportamento
Carro desligado – Bateria carregada	Posição inicial do sistema. Neste estado o veículo elétrico está desligado, mas a bateria encontra-se carregada.
Bateria descarregada	Estado em que a bateria encontra-se totalmente descarregada.
Carregamento externo	Neste estado o veículo está conectado a um plug-in externo para o carregamento da bateria.
Carro ligado	Estado após o condutor ter ligado o carro.
Torque+	Saída do módulo do motor. Aumenta a tensão no pedal.
Torque-	Saída do módulo do motor. Diminui a tensão no pedal.
Frente	Saída do módulo de transmissão. Indica a direção do movimento do veículo.
Ré	Saída do módulo de transmissão. Indica a direção do movimento do veículo.
Movimento	Estado intermediário da movimentação do veículo, a partir dele haverá ou não continuação do movimento.
Parado normal	Estado em que o carro se encontra após o condutor acionar os freios de pedal.
Parado	Estado de imobilidade do veículo elétrico devido ao acionamento do freio de emergência ou a diferença de rotação considerável nas rodas.

É apresentado na Tabela 4.6 as transições e comportamentos da rede de Petri do modelo completo do veículo elétrico.

Tabela 4.6 – Definição das transições da rede de Petri do modelo do veículo elétrico

Transição	Comportamento
Sinal de descarregou	No painel de monitoramento da bateria é acionada uma luz que indica que a bateria está totalmente descarregada.
Sinal de carregar	Após conectar o veículo elétrico na rede, para o carregamento, uma luz indicará que o veículo estará sendo carregado.
Carregamento completo	Após terminar o carregamento uma luz irá informar que a carga está completa.
Partida	Transição acionada pela ignição do veículo, através do condutor.
Polaridade+	Representa o sentido de giro do motor. Sentido direto.
Polaridade-	Representa o sentido de giro do motor. Sentido reverso.
T+	Transição da transmissão do veículo. Transição acionada pelo condutor, indicando marcha frente.
T-	Transição da transmissão do veículo. Transição acionada pelo condutor, indicando marcha ré.
Acelerar/ Acelerar-	Transição acionada pelo condutor ao pressionar o pedal de aceleração do veículo.
Freio Total/ Freio Total-	Transição acionada pelo condutor ao pressionar o pedal do freio. Utilizado com o carro em movimento para a realização de manobras.
Reduzir/ Reduzir-	Transição acionada pelo condutor ao pressionar o pedal do freio com o intuito de desacelerar o movimento.
S. Rodas	Transição acionada quando o veículo não detectar as rodas.
Dif 10%	Transição acionada quando um sensor instalado nas rodas constatar uma diferença mínima entre suas rotações.

Freio de Emergência	Transição acionada pelo condutor, por meio de um botão, quando o veículo apresentar alguma falha.
Falha tensão motor	Transição monitorada pelo módulo de controle para a detecção de falhas no sistema.
Shutdown	Transição de desligamento do veículo, durante a ocorrência de uma falha.
Desligar normal	Transição de desligamento normal do carro.
Freio manual	Transição acionada pelo condutor. Utilizada para estabilizar o veículo em situações em que o carro estiver em terrenos acidentados.
Freio regenerativo	Transição de recuperação da energia cinética utilizada para o carregamento da bateria.
Freio puramente mecânico	Transição referente a utilização dos freios mecânicos sem a recuperação da energia.
Normal	Transição de continuidade do movimento.

Nesse modelo em RdP a marcação inicial foi colocada no estado que representa a bateria descarregada, sendo o ponto de partida para o funcionamento do VE. As mudanças de estado ocorrerão a medida que os elementos sensores do carro disparem as transições.

Finalmente, o modelo desenvolvido do VE tem as seguintes funcionalidades:

- Modelagem da bateria, indicando os estados da bateria: descarregada, sendo carregada por meio externo ou bateria carregada; Assim como a modelagem do freio regenerativo;
- Modelagem da partida do VE, com os estados: carro desligado e carro ligado;
- Modelagem da transmissão, indicando os ramos de marcha direta ou marcha ré, incluindo-se os estados de acelerar, reduzir ou freio total;
- Modelagem dos alertas como os estado: parada normal, freio de emergência e freio por diferença nas velocidades das rodas acima de 10%;
- Modelagem de parada do veículo, por falta de tensão no motor e desligamento normal.

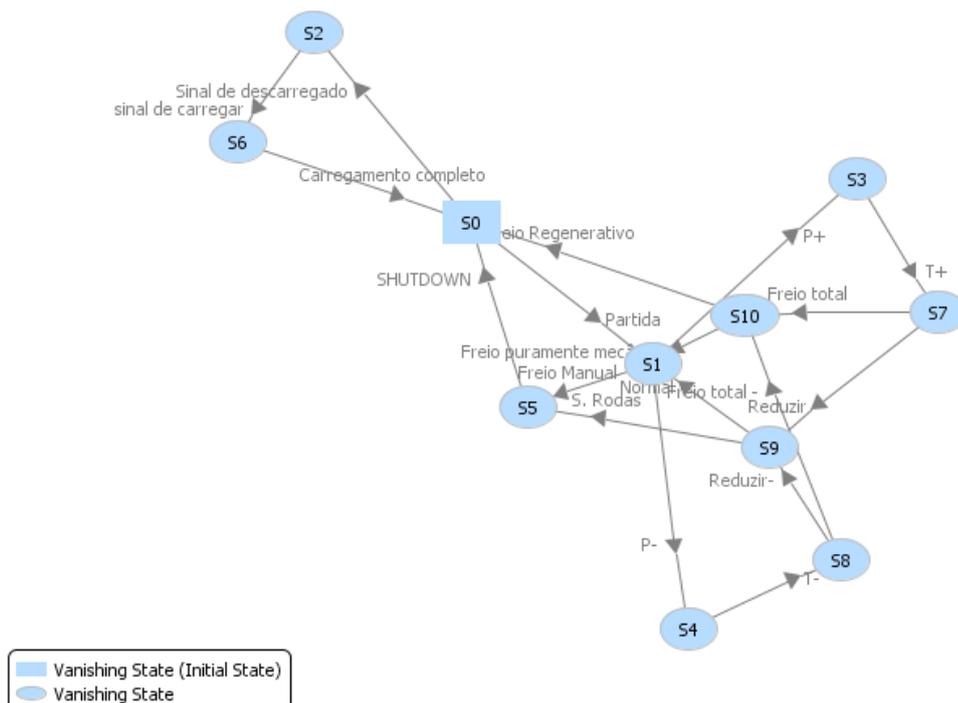
5. ANÁLISE DO MODELO DAS REDES DE PETRI

Existem alguns métodos de análise das RdPs: árvore de alcançabilidade e abordagem de equações matriciais (MURATA,1989). Além desses métodos, a partir do *software* PIPE, um aplicativo de modelagem e análise de rede de Petri, foi possível observar outras propriedades importantes.

5.1. Árvore de alcançabilidade

A partir da marcação inicial (S0), é possível que um determinado número de novas marcações seja obtido, sendo esse número igual ao número de transições habilitadas. Esse processo de obtenção de novas marcações pode ser modelado como uma árvore cujos nós são as marcações e os arcos que ligam os nós representam o disparo de uma transição que leva a transformação de uma marcação em outra.

Figura 5.1 – Árvore de alcançabilidade, pelo *software* PIPE



A partir do resultado obtido do PIPE para o modelo apresentado na Figura 4.14, foi possível observar a alcançabilidade a partir do estado inicial, ou seja, a partir do estado inicial é possível alcançar todos os outros estados.

5.2. Matrizes e equações de estados

A avaliação de comportamentos dinâmicos de sistemas em engenharia é frequentemente definida por meio de algumas equações diferenciais ou algébricas, contudo, não é possível avaliar todo o comportamento dinâmico em RdPs através de equações. Como solução, algumas equações de matrizes podem ser usadas para descrever o comportamento de sistemas concorrentes baseados em RdPs, mas as soluções obtidas com elas são limitadas pela natureza não determinística das RdPs. A seguir, é apresentada na Figura 5.2 a matriz de incidência (11x24) correspondente a análise do modelo visto na Figura 4.14.

Figura 5.2 – Matriz de incidência, pelo *software* PIPE

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

A equação fundamental, ou equação de estados, possibilita a análise da acessibilidade das marcações, bem como o número de vezes que cada transição deve ser disparada.

A equação fundamental das RdP é:

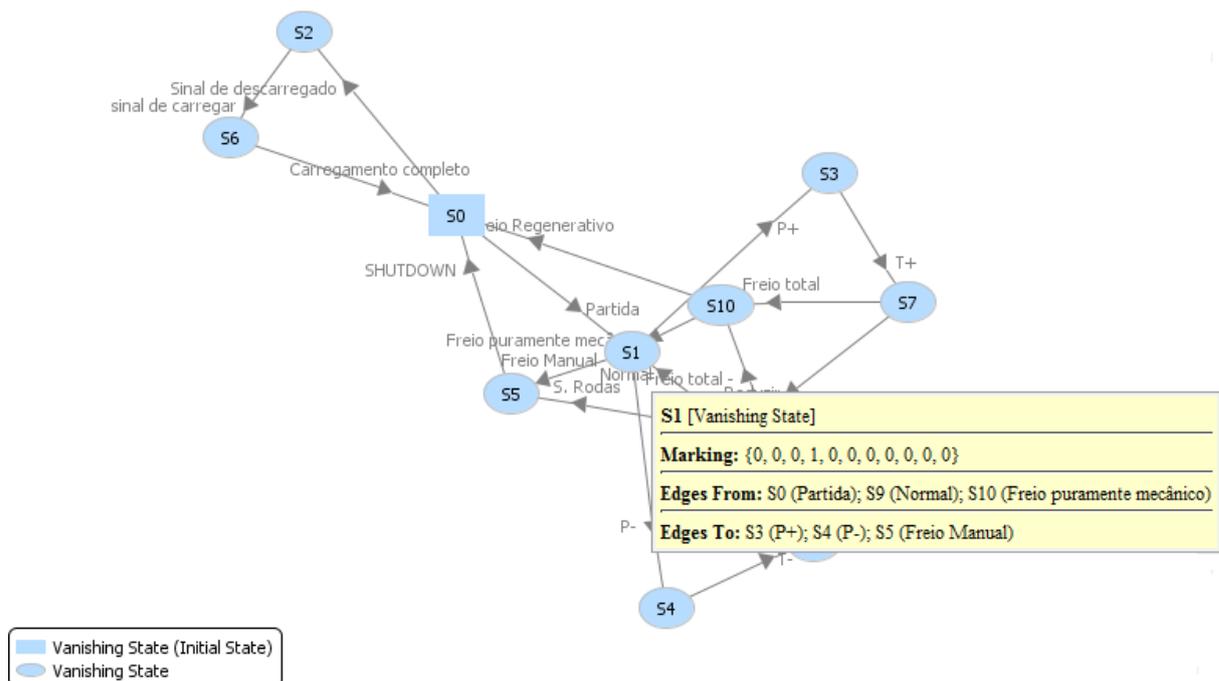
$$M_d = M_o + A^T \sum_{k=1}^d u_k \quad (2)$$

Em que u_k representa o número de vezes que as transições foram disparadas para a obtenção da matriz M_d a partir de M_o , e A é a matriz de incidência, dada pela diferença entre as matrizes de pós e pré-condições ($A = \text{Saída}(O) - \text{Entrada}(I)$). A partir da solução matricial, podem-se determinar as relações entre os números de disparos das transições.

5.3. Limitabilidade e Segurança

Podemos observar que a RdP apresentada é limitada, e, portanto é segura, pois todos os lugares admite um número finito de marcas. Foi possível visualizar através do PIPE o comportamento da RdP, na Figura 5.3 podemos observar que as marcações são limitadas.

Figura 5.3 – Detalhes da limitação, pelo *software* PIPE



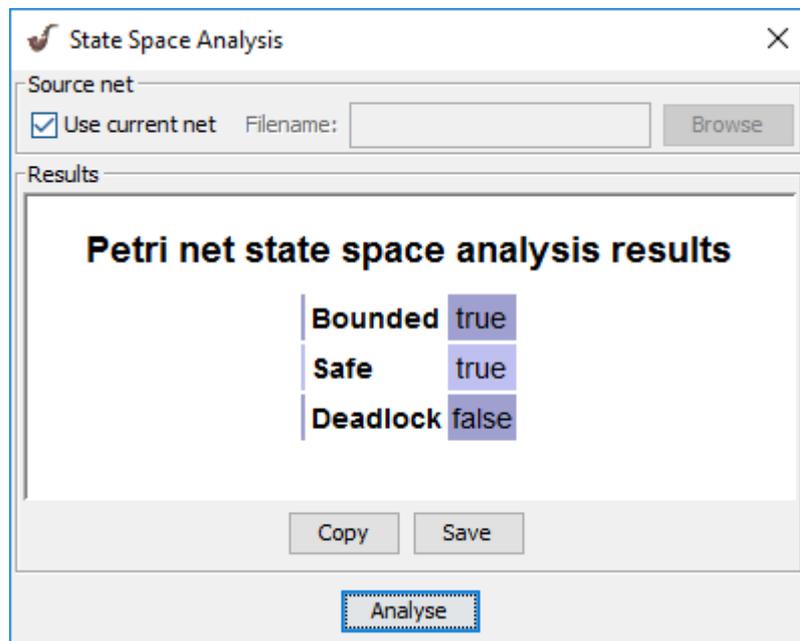
5.4. Vivacidade

Uma RdP é dita viva se, independentemente de qual marcação é alcançada a partir da marcação inicial, é sempre possível disparar qualquer transição da rede por alguma sequência de disparos. Esta propriedade está intimamente relacionada à ausência de *deadlocks*, situações de autotravamento, na operação de um sistema.

Essa propriedade é de fundamental importância para a regulação de muitos sistemas. Contudo, sua identificação nem sempre é simples e o custo de verificação para alguns sistemas pode ser muito elevado (FATORRI,2012).

A RdP estudada é viva, uma vez que sempre haverá uma transição habilitada para disparo, evitando, desta maneira, a condição de auto-travamento (*deadlock*). Essas condições podem ser observadas na Figura 5.4, a análise foi realizada pelo *software* PIPE por meio de equações de espaço de estados.

Figura 5.4 – Análise da vivacidade e segurança, pelo *software* PIPE



5.5. Reversibilidade

É a propriedade que verifica se é possível retornar ao estado inicial. A RdP do nosso estudo é reversível pois conseguimos a partir de um determinado número de disparos retornar ao estado inicial.

5.6. Análise da simulação

Uma vez verificada a funcionalidade do modelo utilizando a ferramenta computacional PIPE, nesta seção será realizada uma análise considerando-se as sequencias de

disparos aleatórios das transições. Além disto, é possível simular uma determinada quantidade de disparos e o programa apresentará tanto a sequência de disparos que foi realizada, mostrando quais componentes foram utilizados, quanto uma tabela com o percentual de utilização de cada componente. A partir destes dados percentuais foi possível construir gráficos mostrando os principais estados utilizados pelo veículo.

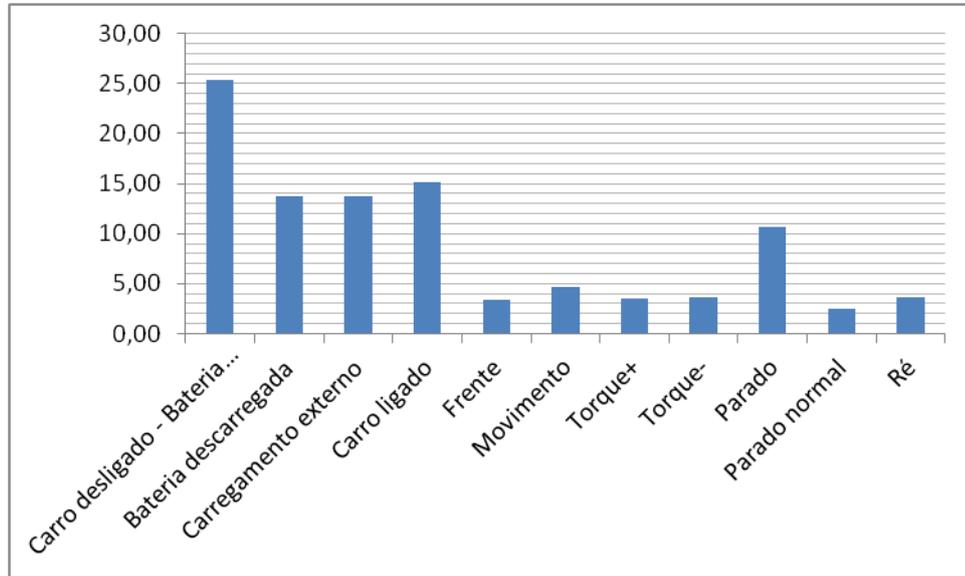
A simulação foi realizada para mil disparos aleatórios e repetida cem vezes. Os resultados obtidos mostram o percentual de utilização para cada estado da rede de Petri. Os dados coletados podem ser observados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 – Tabela com dados da simulação.

Lugares	Simulação (%)	Desvio +/- (%)
Bateria carregada	25,38	1,50
Bateria descarregada	13,69	1,97
Carregamento externo	13,69	1,97
Carro desligado	15,19	1,46
Carro ligado	3,40	1,03
Frente	4,60	1,14
Movimento	3,50	1,03
Torque+	3,70	1,11
Torque-	10,69	1,47
Parado	2,50	0,89
Parado normal	3,70	1,12
Ré	25,38	1,50

A partir da Tabela 5.1 foi possível construir um gráfico do percentual de utilização que pode ser visto na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Gráfico do percentual de utilização



Fonte: Autora

Apesar do modelo em estudo tratar de um sistema a evento discreto, é possível analisar a frequência de utilização de estados a partir de um conjunto de disparos aleatórios válidos que simulam a movimentação do veículo elétrico. Na simulação não está sendo considerado o intervalo entre um estado e outro, mas sim que a transição irá ocorrer independente do tempo decorrido. É apresentado na Figura 5.5 e na Tabela 5.1 o resultado da simulação, em percentual. A partir dos dados coletados é possível identificar os estados em que ocorreu o maior número de interações. Com esta informação é possível desenvolver um método que potencialize esses estados, promovendo meios de informação ao condutor do tempo de utilização de cada parte do veículo, proporcionando a manutenção preventiva dos equipamentos.

6. CONCLUSÕES

A constante preocupação com o planeta, com as emissões de gases e com um modo de vida mais sustentável fez com que a indústria automotiva buscasse fontes alternativas de energia para seus veículos. Os veículos elétricos são uma opção para este problema, pois não emitem gases poluentes e possuem um baixo consumo. O interesse no desenvolvimento desse tipo de veículo tem aumentado, nos últimos anos, promovendo um incentivo a pesquisa e desenvolvimento de tecnologia que diminuam a dependência desse setor com relação ao petróleo.

Partindo do cenário brasileiro em que o Brasil é hoje um dos maiores mercados consumidores de carros, e que os veículos elétricos já fazem parte desta realidade, foi proposto e analisado o estudo e modelagem deste tipo de veículo utilizando o modelo das redes de Petri. O veículo que foi tomado como referência para o projeto foi o da Equipe da Fórmula SAE da UFPB.

Neste trabalho foi realizada a modelagem do veículo elétrico e a análise do modelo utilizando redes de Petri. Buscou-se estruturar o modelo de maneira que fosse possível representar o comportamento do sistema, facilitando seu entendimento e observação dos estados dos componentes.

O modelo é constituído pela integração dos módulos da bateria, controle, motor, transmissão e frenagem. Esta integração é bastante útil, pois nos permite analisar o veículo como um único sistema, tornando possível a análise da frequência do uso de seus componentes. Esta análise pode ser utilizada como ferramenta de tomada de decisões no projeto do veículo visando a otimização na manutenção dos componentes do modelo.

O modelo final do veículo foi simulado através da ferramenta computacional de simulação PIPE, obtendo-se resultados que comprovam a validade do modelo desenvolvido no estudo dos veículos elétricos. Complementarmente, pode-se afirmar que este modelo proposto poderá ser adaptado para futuros projetos de veículos elétricos urbanos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARDOSO, J. , VALETTE, R. *Redes de Petri*. Florianópolis, 1997
- REVOREDO, Téo C. *Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível*. Rio de Janeiro, 2007.
- CASTRO, Bernardo H. R. de e FERREIRA, Tiago T. *Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades*. BNDES, Rio de Janeiro, 2010.
- BEVILAQUA, André. *Redução automatizada de redes de petri baseada em algoritmos genéticos*. Dissertação de Mestrado. São Carlos: UFSCar, 2014.
- SANTOS, Rossini Sálvio Bomfim dos. *Modelagem e análise de performance de sistemas flexíveis de manufatura baseado em redes de petri temporizadas: estudo de caso na industria automobilística/ R.S.B. dos Santos*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- MONTEZANO, Andre Felipe M. *Modelo em rede de petri de um sistema de automação de elevador de passageiros*. Trabalho de conclusão de curso. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.
- ZHOU, M. e Venkatesh, K. *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems: a Petri Net Approach*, World Scientific, 1998.
- MURATA, T. *Pretri nets: Propertier, analysis and applications*. Proceedings of IEEE, v.77, p. 541 – 580, 1989.
- PAREDES, M. G. S. P., POMILIO, J. A. e MASTELARI, N. *Modelagem de Frenagem Regenerativa em Veículo Elétrico*. Revista Ciência e Tecnologia, v.15, p. 15 – 21 jul/dez. 2012.
- BOSCH, R., *Manual de Tecnologia Automotiva*. Tradução: Helga Madjderey, Gunter W. Prokesch, Euryale de Jesus Zerbini, Suely Pfeferman – São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- NOCE, Toshizaemom, *Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento*. Toshizaemom Noce. Belo Horizonte, 2010.
- RUEDA, Oscar A. S., *Controle do Motor de Indução para Veículos Elétricos mediante o uso de Duplo Conversor*. Oscar Antonio Solano Rueda – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

- OLIVEIRA, Jonas, BERNARDO, André e ARAUJO, Tarso, *O que falta para o carro elétrico pegar?* Revista Galileu online, acesso em 10/03/2017: <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,ERT322726-17579,00.html>.
- OGAWA, Vanessa G. C., *Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de bateria para uso na modelagem de sistemas de partida de veículos automotivos*. V. G. C. Ogawa. Ed. Revisada. São Paulo, 2011.
- FATORRI, Caio C., KANO, Célia H., JUNQUEIRA, Fabrício, MIYAGI, Paulo E., *Rede de Petri e o aplicativo Platform Independent Petri net Editor (PIPE)*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.
- Datasheet motor YASA 750, acesso em 20/04/2017: http://www.yasamotors.com/wp-content/uploads/2014/07/Datasheet-YASA-750_en-ID-15637.pdf
- SILVA, Artur S. da, *Banco Esportivo para Fórmula SAE, Projeto & Construção*. Trabalho de conclusão de curso. Curitiba, 2015.
- FORMULA SAE. *Site para consultas e questionamentos sobre a categoria Formula da SAE*, acesso em 15/05/2017: <http://www.fsaeonline.com/>
- IMBASCIATI, Henrique, *Estudo descritivo dos sistemas, subsistemas e componentes de veículos elétricos e híbridos*. Henrique Imbasciati. – São Caetano do Sul, SP: CEUNEEM, 2012.
- DF51 – Inversor de Frequência, *Guia para consultas rápidas 7/05 AWB8230*. Manual do fabricante – Moeller.
- BARRETO, Gilmar, *Veículo Elétrico a bateria: contribuições à análise de seu desempenho e seu projeto (volume 1)*. UNICAMP, 1986.
- SANTOS, Wesley Paulo dos, *Otimização no processo de fabricação de salsicha*. Trabalho de conclusão de curso. Recife: UFPE, 2009.