Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RELATÓRIO DE ESTÁGIO INTEGRADO

RELATÓRIO DE ATIVIDADES DESENVOLVIDAS COMO PARTE DE PROJETO REALIZADO NO LABORATÓRIO DE SISTEMAS EMBARCADOS E COMPUTAÇÃO PERVASIVA

Campina Grande, Paraíba
Março de 2017

ARTHUR VIDAL DE NEGREIROS SILVA

RELATÓRIO DE ATIVIDADES DESENVOLVIDAS COMO PARTE DE PROJETO REALIZADO NO LABORATÓRIO DE SISTEMAS EMBARCADOS E COMPUTAÇÃO PERVASIVA

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Controle de Sistemas

Orientador:
Professor Saulo Oliveira Dornellas Luiz, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Março de 2017

ARTHUR VIDAL DE NEGREIROS SILVA

RELATÓRIO DE ATIVIDADES DESENVOLVIDAS COMO PARTE DE PROJETO REALIZADO NO LABORATÓRIO DE SISTEMAS EMBARCADOS E COMPUTAÇÃO PERVASIVA

Relatório de Estágio Integrado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Controle de Sistemas

Aprovado em / /

_____

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

_____

Professor Saulo Oliveira Dornellas Luiz, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus por me proporcionar esta oportunidade e de me preencher com curiosidade e disciplina para organizar meus estudos.

Agradeço aos meus pais, por terem me criado com uma boa educação, por terem me alimentado com saúde, força e coragem, as quais foram essenciais para a superação de todos os obstáculos ao longo desta caminhada. Sem dúvida, não fosse pela forma que eles me ensinaram a viver, não estaria aqui.

Agradeço à minha namorada, que me entendeu, auxiliou, criticou e contribuiu de maneira ímpar no meu crescimento pessoal e profissional, uma vez que posso responsabiliza-la por grande parte das minhas conquistas e desafios vencidos.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Agradeço aos meus amigos, que sempre me apoiaram e me instigaram a crescer profissionalmente e vencer os desafios que a vida nos proporciona. Foi nas amizades mais sinceras que encontrei força e aprendizados que me levaram a concluir este curso.

Agradeço ao meu orientador, Saulo Luiz, pela paciência e tempo dedicado, pelas sugestões, conselhos e correções, assim como ter acreditado em meu potencial durante todos os anos em que me orientou. Agradeço principalmente pelos ensinamentos e empenho em me ensinar.

Agradeço a Bruna Maria, Breno Henriques, Andrei Patriota, Reiron Juan e Marcus Marinho pelo companheirismo, auxílios, risadas e dúvidas esclarecidas. Nos últimos meses, passei muitas horas dos meus dias dentro do laboratório e em sua companhia.

Agradeço aos membros do Ramo Estudantil IEEE UFCG e do Capítulo Estudantil IEEE PES UFCG, pelas parcerias, estudos, projetos e todos os períodos que estiveram ao meu lado.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande, à Coordenação de Engenharia Elétrica e ao Departamento de Engenharia Elétrica, por todas as ajudas e dúvidas esclarecidas durante o curso. Posso afirmar com certeza, que parte da excelência do curso de Engenharia Elétrica, se deve à eficiência e disposição dos funcionários que o compõem.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

"Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar num sonho que se tem..."

Renato Russo

SUMÁRIO

Agradecimentos iv
Sumário vii
Lista de Ilustrações viii
Lista de Tabelas ix
1 Introdução 1
2 Estruturação 2
2.1 Estrutura Organizacional 2
2.2 Estrutura Física 2
2.2.1 Carga Eletrônica DC 3
2.2.2 Baterias Chumbo-Ácido Estacionárias 3
2.2.3 Carregador de baterias 5
3 Especificações Técnicas de Baterias 6
3.1 Estado de Saúde 6
3.2 Estado de Carga 6
3.3 Tensão de descarga 6
3.4 Capacidade Nominal 7
3.5 Corrente Nominal 7
4 Atividades Desenvolvidas 8
4.1 Revisão Bibliográfica 9
4.2 Pesquisa 9
4.2.1 Estudo e documentação dos métodos 9
4.2.2 Escolha do método 13
4.3 Desenvolvimento 14
4.3.1 Testes e aquisição de dados 14
4.3.2 Construção do modelo 16
4.3.3 Implementação do método 18
5 Considerações Finais 19
6 Bibliografia 20

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma hierarquico da equipe. 2
Figura 2 – Relação entre capacidade e corrente da bateria utilizada. 4
Figura 3 – Diagrama de Nyquist para uma bateria. 10
Figura 4 – Perfil de descarga do Método dos dois pulsos. 11
Figura 5 – Relação sugerida entre Capacidade residual e resistência interna. 12
Figura 6 – Ciclo de pulsos utilizado para uma descarga pulsada. 15
Figura 7 – Perfis de corrente para o teste de construção do modelo de estimação do SOH. 15
Figura 8 – Valores de VMAX e $\Delta V2$ para as nove descargas pulsadas monitoradas em laboratório. 16
Figura 9 – Relação entre CRATE e $\Delta V2$ nos experimentos de estimação de SOH. 17
Figura 10 - Diagrama de blocos mais externo em simulink do método implementado. 18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade e corrente para diferentes tempos de descarga. 3
Tabela 2 – Principais características elétricas das baterias especificadas. 4
Tabela 3 – Pontuações atribuídas aos métodos estudados. 13

1 INTRODUÇÃO

Este relatório foi elaborado para apresentar as atividades realizadas no Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva como parte da disciplina de Estágio Integrado, com carga horária de 660 horas. A orientação do estágio foi realizada pelo Professor Saulo Oliveira Dornellas Luiz, e a supervisão pelo Professor Jaidilson Jó da Silva. O estágio foi realizado num projeto de pesquisa e desenvolvimento, no qual o tema central é o monitoramento de baterias chumbo-ácido estacionárias.

Baterias de chumbo ácido são largamente utilizadas na indústria, pois possuem maiores capacidades, quando a massa da carcaça não é levada em consideração. Logo, elas são constantemente aplicadas a equipamentos hospitalares, cadeiras de roda elétricas, luzes de emergência e *nobreaks*. Algumas vantagens podem ser claramente verificadas, como por exemplo:

- É mais barata e simples de ser fabricada;
- Possui uma baixa taxa de auto descarga;
- Possui uma alta capacidade de correntes de descarga.

Entretanto, é interessante destacar que as baterias de chumbo ácido também possuem algumas limitações, entre elas:

- Permite um número limitado de ciclos de descarga profunda (100% de profundidade de descarga);
- Pode ser considerada hostil ao meio ambiente por utilizar ácidos e substancias nocivas[1].

Portanto, as baterias chumbo-ácido estacionárias são constante fonte de pesquisa e desenvolvimento, uma vez que acumuladores de energia são cada vez mais presentes nas novas tecnologias.

1 STA, S. D. T. A. Artigos da STA Sistemas de Tecnologia Aplicada. **Site da STA Sistemas de Tecnologia Aplicada**. Disponivel em: <http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/vantagens-e-limitacoes-das-baterias-chumbo-acido>. Acesso em: Março 2017.

2 ESTRUTURAÇÃO

No início do programa de estágio o estagiário foi apresentado à equipe com a qual ele iria trabalhar e com o local de trabalho dedicado ao mesmo. Logo, foi necessário uma ambientalização junto ao espaço físico e interpessoal do local de estágio.

2.1 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

A equipe de trabalho da qual o estagiário fez parte era composta por 11 pessoas, seguindo a estrutura hierárquica mostrada na Figura 1.

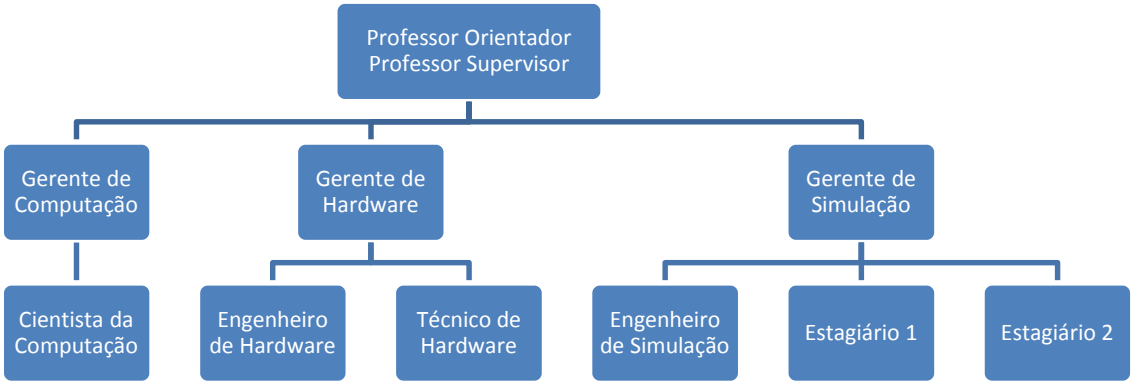

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA HIERARQUICO DA EQUIPE.

O estagiário respondia diretamente ao Gerente de Simulação, responsável por coordenar as atividades desenvolvidas pela equipe. Assim, tarefas e decisões do direcionamento do projeto eram elaboradas pelos gerentes e repassadas aos outros membros das equipes.

2.2 ESTRUTURA FÍSICA

O estágio foi realizado no Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva - EMBEDDED. O local de trabalho era composto por 8 estações de trabalho, sendo quatro delas dedicadas aos testes e aplicações práticas.

Para realizar os experimentos necessários ao cumprimento das atividades, estavam disponíveis os seguintes equipamentos:

- Carga Eletrônica DC;

- Baterias estacionárias de chumbo-ácido;
- Carregador de baterias com 12V/16A;
- *Protoboard* e circuitos de condicionamento.

Foi disponibilizado uma estação de trabalho e um computador para o estagiário realizar as pesquisas e desenvolvimentos necessários. Nas seções seguintes são apresentados os equipamentos utilizados para a realização de testes e experimentos, bem como suas especificações e funcionamentos.

2.2.1 CARGA ELETRÔNICA DC

A carga eletrônica DC fabricada pela *Keysight* do modelo N3300A é um equipamento utilizado para simular uma carga e drenar uma corrente específica de uma ou de um conjunto de baterias. Ela pode ser configurada com perfis de corrente em determinados intervalos de tempo, possibilitando assim a realização de testes mais completos e diminuindo a susceptibilidade a falhas humanas.

2.2.2 BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO ESTACIONÁRIAS

Baterias chumbo-ácido estacionárias possuem especificações que descrevem desde sua corrente nominal, até informações da capacidade da bateria (Ampére Hora) em diferentes temperaturas e correntes.

A bateria utilizada nos procedimentos descritos neste relatório foi a FREEDOM DF2000 by Heliar. As informações dispostas nas Tabelas 1 e 2 foram extraídas do manual disponibilizado pelo fabricante da bateria colocada sob teste (FREEDOM, 2013).

TABELA 1 – CAPACIDADE E CORRENTE PARA DIFERENTES TEMPOS DE DESCARGA.

DF2000	Horas																		
	100	20	10	9	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,75	0,5	0,25
Capacidade (Ah)	115	105	94	92	91,8	91	87	85	82,8	81,2	79,1	75	73,8	69	66	60	56,3	48	37,5
Corrente (A)	1,2	5,3	9,4	10,2	11,5	13	14,5	17	18,4	20,3	22,6	25	29,5	34,5	44	60	75	96	150

TABELA 2 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS BATERIAS ESPECIFICADAS.

Característica	Especificação	Valores
Capacidade @25°C (Ah)	10h	94
	20h	105
	100h	115
Dimensões (mm)	Comprimento	330
	Largura	172
	Altura	240
Peso (Kg)		27,1
Torque	Mínimo	13,6 N.m
	Máximo	20,3 N.m
Tensão de Flutuação		de 13,2 a 13,8V @ 25°C
Tensão de carga / equalização		de 14,4 a 15,5V @ 25°C*
Compensação de temperatura		Para cada 1°C acima de 25°C, subtrair 0,033V Para cada 1°C acima de 25°C, adicionar 0,033V

É importante destacar que em baterias chumbo-ácido, quanto maior a corrente, menor é a capacidade em *Ampère* hora que a bateria pode fornecer. Entretanto, esta relação não é linear, como apresentado na Figura 2.

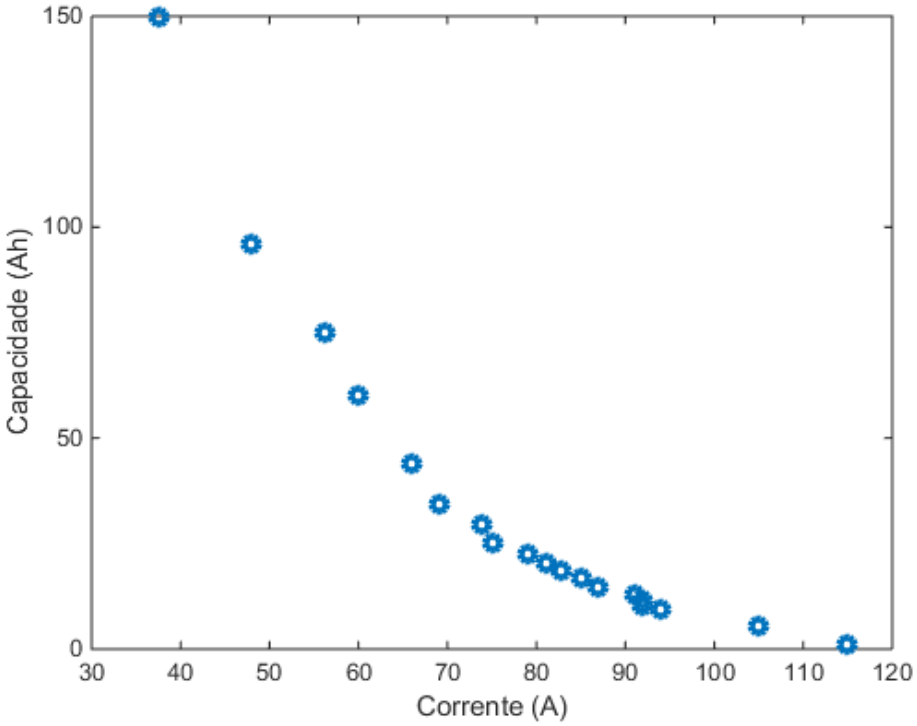

FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE E CORRENTE DA BATERIA UTILIZADA.

2.2.3 CARREGADOR DE BATERIAS

Para carregar as baterias utilizadas nos experimentos propostos, foi utilizado um carregador da marca Expert Charger. Segundo o manual do equipamento, disponibilizado pelo fabricante, o produto possui as seguintes especificações:

- Chave seletora: 127/220 Volts;
- Baixo Consumo: 15 W no modo flutuação;
- 16 A na Carga Máxima;
- Disjuntor de proteção de 20 A;
- Carga de Repouso de 200 mA;
- Saída variável 14,0 Vcc;
- Potência máxima 150 W.

3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE BATERIAS

No campo de trabalho das baterias, são utilizados alguns termos e siglas que podem confundir e dificultar o aprendizado e a eficácia do trabalho desenvolvido. Assim, foi realizado um estudo de ambientalização com os jargões para baterias chumbo-ácido estacionárias.

3.1 ESTADO DE SAÚDE

Como define a ANATEL, por meio da Resolução nº 603, de 13 de novembro de 2012, uma bateria atinge o fim de sua vida útil quando sua capacidade em condições nominais é inferior a 80% da sua capacidade em condições nominais quando nova (ANATEL, 2012). Assim, nessa faixa de 100% a 80% de capacidade, é inserido o conceito de estado de saúde (do inglês *State-of-Health*, SOH), que escalona de 0% a 100% toda a capacidade que a bateria vai perdendo e deixa de fornecer à carga durante a sua vida útil.

3.2 ESTADO DE CARGA

Durante a descarga de uma bateria, a capacidade diminui conforme a carga solicita corrente. Logo, o conceito de estado de carga (do inglês *State-of-Charge*, SOC) é inserido com o objetivo de quantificar a capacidade restante da bateria em relação à sua capacidade inicial. É válido destacar que o valor de SOC é relativo e dependente das condições de descarga da bateria, por exemplo, se uma bateria possui 30% de SOC sob um determinado conjunto de condições de corrente e temperatura, não implica que ela terá os mesmos 30% de SOC sob um outro conjunto de condições de corrente e temperatura.

3.3 TENSÃO DE DESCARGA

A bateria pode ser considerada descarregada quando cada uma de suas células atingem 1,75 V. Logo, para uma bateria de 12 V, que possui 6 células, a tensão entre os seus terminais que a caracteriza como descarregada é de 10,5 V.

3.4 CAPACIDADE NOMINAL

A capacidade nominal de uma bateria é definida pela Resolução nº 603 da ANATEL como a capacidade que a bateria consegue fornecer de forma que ela leve 10 horas para atingir a tensão de descarregada, isto é, 10,5 V. É válido destacar também que a capacidade nominal é normalmente conhecida por C_{10}, que representa a capacidade em 10 horas de descarga.

3.5 CORRENTE NOMINAL

A corrente nominal é definida como a corrente que descarrega a bateria em 10 horas, isto é, a corrente que confere à bateria 10 horas de descarga até atingir a tensão de 10,5 V.

4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

O projeto tem como objetivo construir um modelo para estimar o estado de carga (SOC) e o estado de saúde (SOH) de uma bateria cujo histórico é desconhecido, ou seja, não existe relato dos dados e características que refletem seus parâmetros de funcionamento anteriores ao momento da estimação. Assim, comportamentos e informações sobre seu tempo de vida, correntes de carga ou descarga, temperatura de trabalho, entre outros, são desconhecidos.

Assim, a primeira atividade a ser realizada foi pesquisar na literatura os métodos existentes para a funcionalidade desejada. Os métodos encontrados foram descritos por meio de relatórios e apresentações quinzenais para os responsáveis pelo projeto. Logo, uma vez que a pesquisa foi finalizada, determinou-se qual modelo seria desenvolvido por meio de testes de carga e descarga realizados em laboratório.

A escolha do método foi influenciada por vários fatores, que vão desde a viabilidade da pesquisa e do desenvolvimento, até a confiabilidade e velocidade de execução. Nestes quesitos, os métodos encontrados foram classificados e determinou-se que o método dos dois pulsos (COLEMAN, GERARD HURLEY e K WAN LEE, 2008) seria utilizado na etapa seguinte do projeto: a realização de testes para verificar a veracidade do modelo e em seguida a sua construção.

Após a definição de qual método seria utilizado, foram iniciados os testes em laboratório para verificar a eficiência do método escolhido, e posteriormente, utilizar os dados para a construção e implementação do modelo de estimação.

Portanto, foram listadas as seguintes atividades, que são exploradas de maneira mais detalhada nos próximos capítulos deste relatório:

- Revisão bibliográfica;
- Estudo e documentação dos métodos existentes;
- Escolha do método;
- Testes e aquisição de dados;
- Construção do modelo.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo da revisão bibliográfica foi identificar os métodos existentes na literatura e os artigos e livros que validam e detalham o funcionamento dos métodos em questão.

Por se tratar de um objeto de pesquisa do qual o estagiário não possuia conhecimento prévio, foi necessária uma adaptação e entendimento do problema em questão. Assim, como método de pesquisa, foi utilizada a Internet e bancos de artigos que disponibilizam documentos técnicos e teóricos. Como fonte, também foram verificadas patentes de produtos e empresas atuantes no mercado.

Após dois meses dedicados à pesquisa, foram encontrados quatro possíveis métodos de serem estudados e implementados:

- Método da espectroscopia da impedância eletroquímica;
- Método dos dois pulsos de descarga;
- Método da resistência interna mediana;
- Teste de descarga profunda.

4.2 PESQUISA

A primeira parte do estágio foi composta pela pesquisa. Durante os meses de novembro e dezembro de 2016 foram realizadas revisões bibliográficas, pesquisas de artigos e livros, contato com autores de estudos relevantes e outras formas de se adquirir conhecimento suficiente para implementar o método correto no restante do projeto. Assim, foi realizado o estudo e documentação dos métodos encontrados e em seguida foi feita uma análise dos modelos disponíveis para se decidir por qual a equipe iria optar. Ao todo foram analisados 31 documentos, entre artigos técnicos, patentes e apresentações de slides.

4.2.1 ESTUDO E DOCUMENTAÇÃO DOS MÉTODOS

Os quatro métodos encontrados na literatura foram detalhadamente estudados, a fim de se decidir qual modelo seria implementado. Os parágrafos seguintes apresentam os modelos encontrados, suas referências e um breve resumo do método a ser discutido.

O método da espectroscopia da impedância eletroquímica foi encontrado em alguns artigos científicos e apresentações de laboratórios e universidades. A primeira referência encontrada foi escrita por Nguyen e mostra, em termos gerais, a forma como funciona o método da espectroscopia (EIS) e exibe alguns testes e experimentos realizados a fim de comprovar a eficácia do modelo (NGUYEN, TRAN e CHOI, 2014). É importante destacar que o EIS é um método científico que pode ser aplicado a diversas áreas da engenharia, e o artigo escrito por Nguyen mostra especificamente como proceder quando se deseja utilizar o EIS para estimar o tempo de vida de uma bateria. Outro texto que também foi utilizado como referência para entender o EIS foi escrito por Reece e descreve o EIS como uma caracterização perturbadora das dinâmicas de um processo eletroquímico (REECE, 2005), isto é, uma forma de caracterizar a bateria perturbando-a com sinais conhecidos e realizando análises sobre a resposta obtida. Este método possui uma precisão bastante alta e por ser um método completamente baseado em artifícios matemáticos, como por exemplo o diagrama de Nyquist, é bastante aceito na literatura, estando presente também em algumas patentes de produtos e empresas presentes no mercado (TINNEMEYER, 2004).

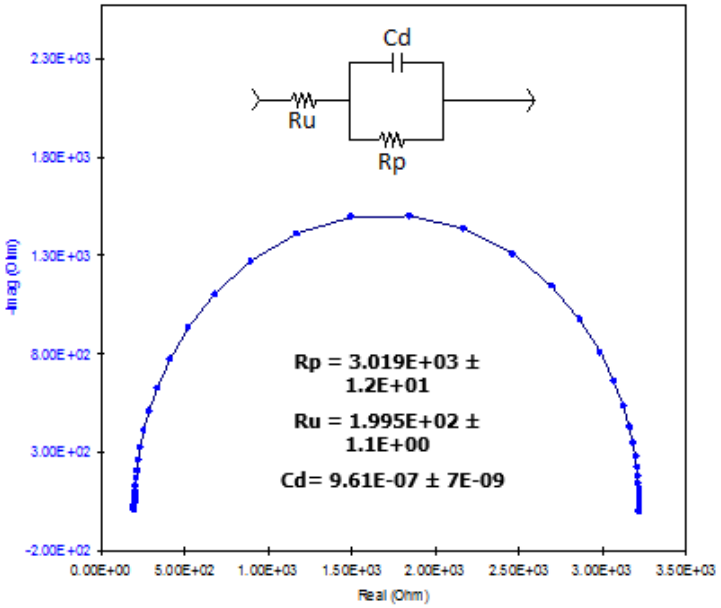

FIGURA 3 – DIAGRAMA DE NYQUIST PARA UMA BATERIA[1].

A Figura 3 mostra como o diagrama de Nyquist pode ser utilizado para se extrair as informações desejadas. Basicamente, uma bateria pode ser representada por um circuito elétrico formado por um resistor em série com uma associação paralela entre um

1 *INSTRUMENTS*, G. *Gamry Instruments Website*. ***Gamry Instruments Website***. Disponivel em: <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>. Acesso em: 13 de Março de 2017.

resistor e um capacitor. Esta representação é conhecida como circuito do tipo Randles e pode ser encontrada em vários textos da literatura. Desta forma, aplicando na bateria sinais de diferentes frequências, obtém-se a resposta em frequência da bateria, consequentemente seu diagrama de Nyquist e pode-se então estimar os valores dos componentes do modelo da forma de circuito elétrico da bateria sob teste. Com base em um banco de dados, os valores das resistências estimadas são comparados às de uma bateria nova e o SOH pode ser estimado desta simples relação.

O método dos dois pulsos de carga possui apenas três artigos na literatura. O primeiro define o funcionamento e introduz o modelo proposto por Martin Coleman (COLEMAN, GERARD HURLEY e K WAN LEE, 2008). O artigo original explica que são utilizados dois pulsos de descarga para definir o valor do SOC e o SOH. Os pulsos e os intervalos de tempo são definidos conforme apresentado na Figura 4. São dois pulsos de corrente com duração de 10 segundos, e com o valor da corrente a ser definido pelo usuário, a depender das especificações da bateria sob teste.

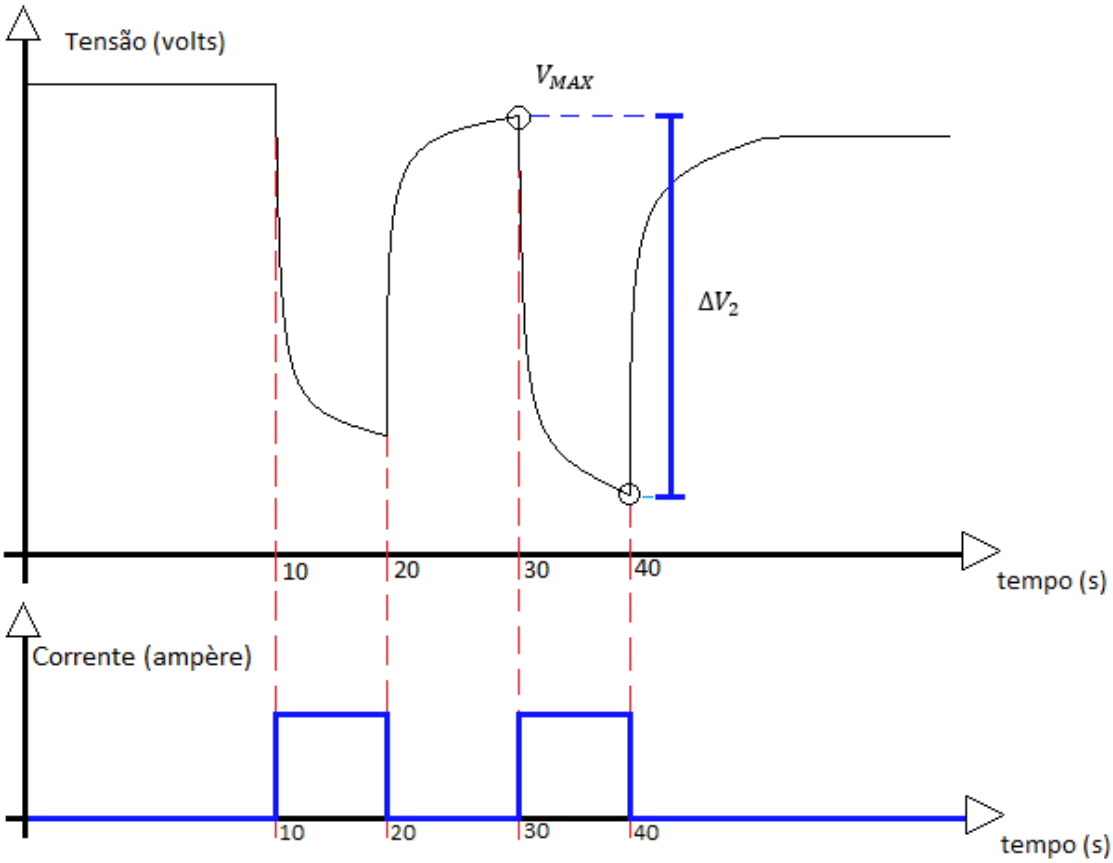

FIGURA 4 – PERFIL DE DESCARGA DO MÉTODO DOS DOIS PULSOS.

O método consiste de estimar quatro parâmetros: α, β, γ e δ, que são usados nas expressões matemáticas que utilizam as duas medições realizadas durante os testes, isto

é, os valores de V_{MAX} e ΔV_2, para estimar o SOC e SOH. Além do texto original, outros dois artigos foram utilizados como fonte de pesquisa para este método. Marchildon, Doumbia e Agbossou validaram o método utilizando três baterias do mesmo fabricante e com a mesma capacidade (MARCHILDON, DOUMBIA e AGBOSSOU, 2015), e Coleman, Lee e Hurley fizeram uma validação experimental e introduziram algumas novas equações e conceitos no método dos dois pulsos (COLEMAN, LEE e HURLEY, 2006).

Outra forma de se determinar o estado de saúde de uma bateria é realizando uma descarga profunda nas condições nominais. A ABNT NBR 14199 define a capacidade nominal de uma bateria quando nova (ABNT, 2014). Assim, para saber o estado de saúde de uma bateria em qualquer período de sua vida, basta realizar uma descarga profunda e comparar a capacidade obtida com os valores de referência. Entretanto, a capacidade nominal de uma bateria é adquirida com uma descarga de aproximadamente 10 horas, o que faz com que os testes tenham uma longa duração.

O método detalhado por Yang e Huang sugere que a capacidade total pode ser estimada por meio da resistência interna da bateria. Tal resistência seria determinada por meio da divisão da variação da tensão dividida pela corrente de descarga, isto é, $\frac{\Delta V}{I}$. Assim, baseado em modelos construídos por meio de um banco de dados, a resistência interna poderia ser utilizada para estimar a capacidade total, que por sua vez pode ser utilizada para estimar o estado de saúde.

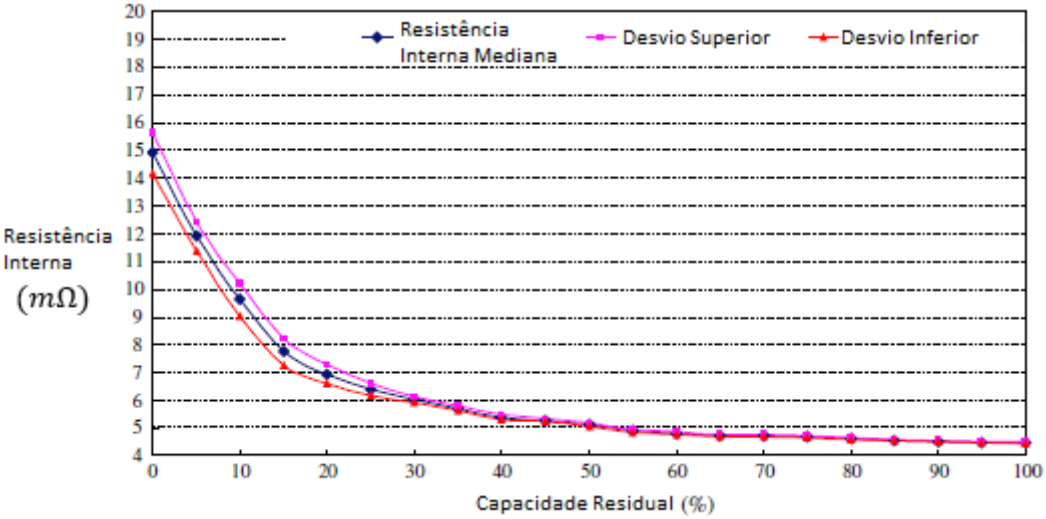

FIGURA 5 – RELAÇÃO SUGERIDA ENTRE CAPACIDADE RESIDUAL E RESISTÊNCIA INTERNA.

Como apresentado na Figura 5, a curva que relaciona a resistência interna e a capacidade residual tem o formato de uma exponencial, o que faz com que variações pequenas na resistência interna sejam interpretadas como uma grande variação da capacidade, na faixa que tange de aproximadamente 35% até 100%, e implica em erros bastante altos durante a análise.

4.2.2 ESCOLHA DO MÉTODO

Diante dos quatro modelos apresentados, podemos analisar e comparar os modelos para definir qual método será implementado, considerando os seguintes critérios:

- Complexidade de desenvolvimento
- Quantidade de processamento
- Duração dos testes
- Precisão dos resultados

Para decidir qual dos métodos será implementado, foram atribuídas pontuações, de 1 a 10, onde 1 quantifica muita complexidade de implementação e 10 significa pouca complexidade de implementação, a cada um dos critérios analisados, gerando assim uma espécie de classificação. Na Tabela 3 são apresentadas as pontuações dadas a cada um dos modelos estudados. Pode-se perceber que o método de descarga profunda é o melhor em termos de precisão, seguido pelo EIS e pelo método dos dois pulsos. Entretanto, por ser um método muito complexo e que requer muito processamento, o EIS possui uma implementação inviável considerando o tempo e orçamento do projeto em questão.

	Complexidade	Processamento	Duração dos testes	Precisão	Total
Espectroscopia (EIS)	2	4	7	9	22
Dois Pulsos de Descarga	7	8	10	5	30
Descarga Profunda	8	6	1	10	25
Resistência Interna	5	8	6	1	20

TABELA 3 – PONTUAÇÕES ATRIBUÍDAS AOS MÉTODOS ESTUDADOS.

O método dos dois pulsos apresentou a melhor pontuação, e consequentemente a melhor relação Custo X Benefício para o projeto em desenvolvimento. Assim, deu-se início à etapa de desenvolvimento.

4.3 DESENVOLVIMENTO

Uma vez que foi definido que o método a ser implementado é o Método dos Dois Pulsos, foi iniciada a parte mais prática do estágio: o desenvolvimento do modelo em questão.

4.3.1 TESTES E AQUISIÇÃO DE DADOS

O Método dos Dois Pulsos faz duas estimativas distintas: SOC e SOH. As equações utilizadas para realizar as estimações de SOC, C_{RATE}, AHC e SOH são respectivamente (1), (2), (3) e (4) .

$$SOC = \alpha . V_{MAX} + \beta \tag{1}$$

$$C_{RATE} = \delta . \Delta V_2 + \gamma \tag{2}$$

$$AHC = \frac{I}{C_{RATE}} \tag{3}$$

$$SOH = \frac{AHC_{Envelhecida}}{AHC_{Nominal}} \tag{4}$$

A variável C_{RATE} é definida como o valor da corrente normalizado por unidade de AHC. Já AHC é definido como a capacidade total que pode ser extraída da bateria em condições pré-definidas de corrente e temperatura.

Logo, para estimar os parâmetros das equações (1) e (2), são necessários dois tipos de testes. O primeiro deles é composto por vários ciclos de pulsos que são aplicados até que a bateria atinja a tensão de 10,5 volts, o que corresponde a 1,75 V por célula (ABNT, 2014). Na Figura 6 é apresentado o perfil de corrente em um ciclo de pulso. O ciclo é composto pela seguinte sequência: pulso de 10 segundos, repouso de 10 segundos, pulso de 10 segundos, repouso de 30 segundos, pulso de 60 segundos e repouso de 60 segundos.

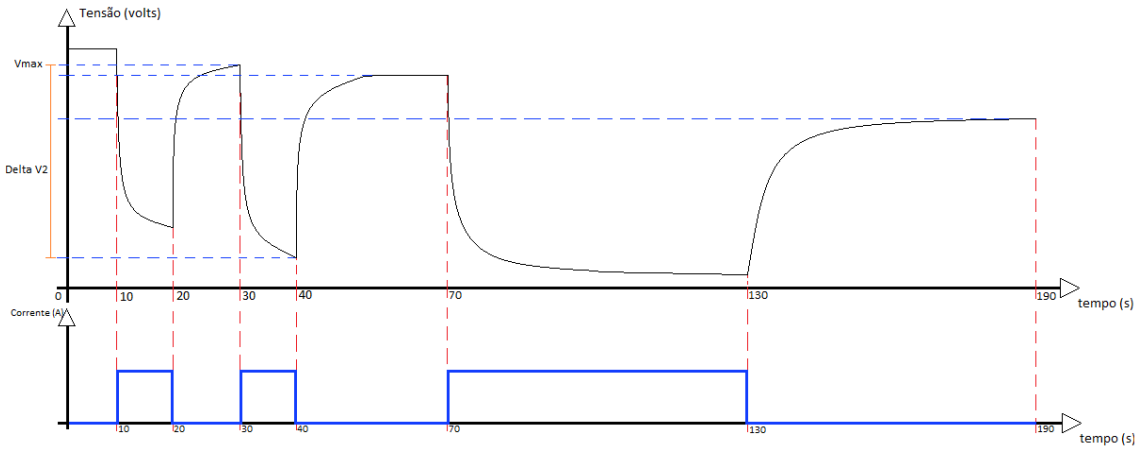

FIGURA 6 – CICLO DE PULSOS UTILIZADO PARA UMA DESCARGA PULSADA.

Os dois primeiros pulsos de corrente servem para viabilizar a mediação dos valores de V_{MAX} e ΔV_2, como visto na Figura 6. Já o terceiro pulso é utilizado para retirar um pouco de carga da bateria, a fim de que as medições no próximo ciclo sejam num estado de carga diferente. Assim, são aplicados ciclos de pulsos até que a bateria atinja a tensão de 10,5 V entre seus terminais. Foram realizados testes com três valores de corrente diferentes, para se obter uma maior confiabilidade dos modelos extraídos dos dados coletados em laboratório. No total, foram completados nove testes para a estimação do valor do estado de carga.

O segundo teste tem como objetivo fornecer dados para a construção do modelo de estimação do SOH. Para tal, foi realizado um teste composto por cinco pares de pulsos, cada par com um valor de corrente distinto, e em seguida a bateria foi descarregada na corrente nominal. Na Figura 7 são apresentados os perfis de corrente utilizados para o teste em questão.

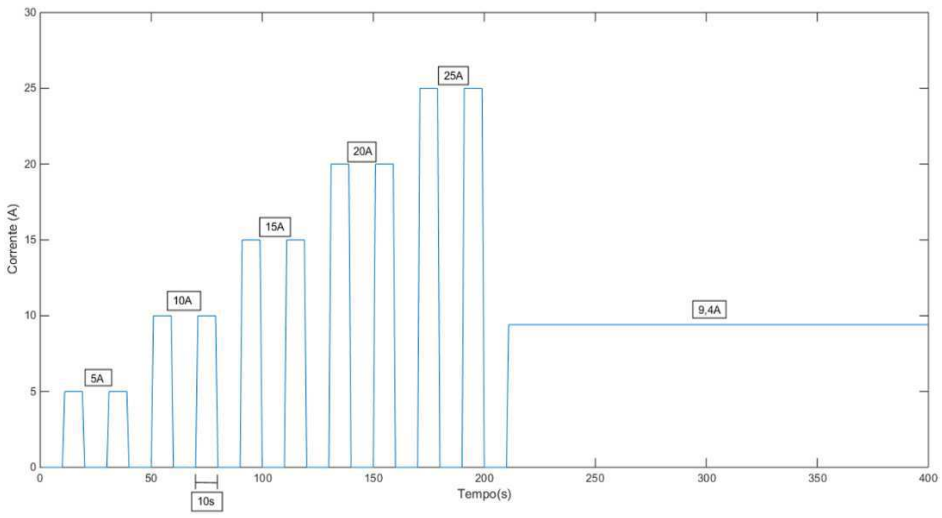

FIGURA 7 – PERFIS DE CORRENTE PARA O TESTE DE CONSTRUÇÃO DO MODELO DE ESTIMAÇÃO DO SOH.

Foram aplicados cinco pares de pulsos, cada par a 5A, 10A, 15A, 20A e 25A, respectivamente, e em seguida a bateria foi descarregada com corrente constante de 9,4A, que é a corrente nominal da bateria sob teste. No total, foram realizados três testes para a construção do modelo de estimação do estado de saúde.

Assim, os testes propostos foram realizados em três baterias com as mesmas especificações, de forma a garantir com redundância, confiabilidade ao modelo construído.

4.3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

A partir dos dados coletados, os modelos puderam então ser construídos de forma a estimar com relativa precisão, como mostram os erros nas seções seguintes, os valores de SOC e SOH. Inicialmente foram analisados os dados coletados nas descargas pulsadas, relativas à estimação do SOC. Para tal, foi necessário realizar o tratamento, utilizando o *software* MATLAB para extrair das medições de tensão os valores de V_{MAX} e ΔV_2 para cada um dos ciclos de pulsos aplicados. Assim, uma vez que os nove testes propostos foram realizados, obteve-se o gráfico da Figura 8, onde se observa que mesmo descarregando baterias diferentes com correntes diferentes, os resultados ficaram numa mesma região do gráfico estudado.

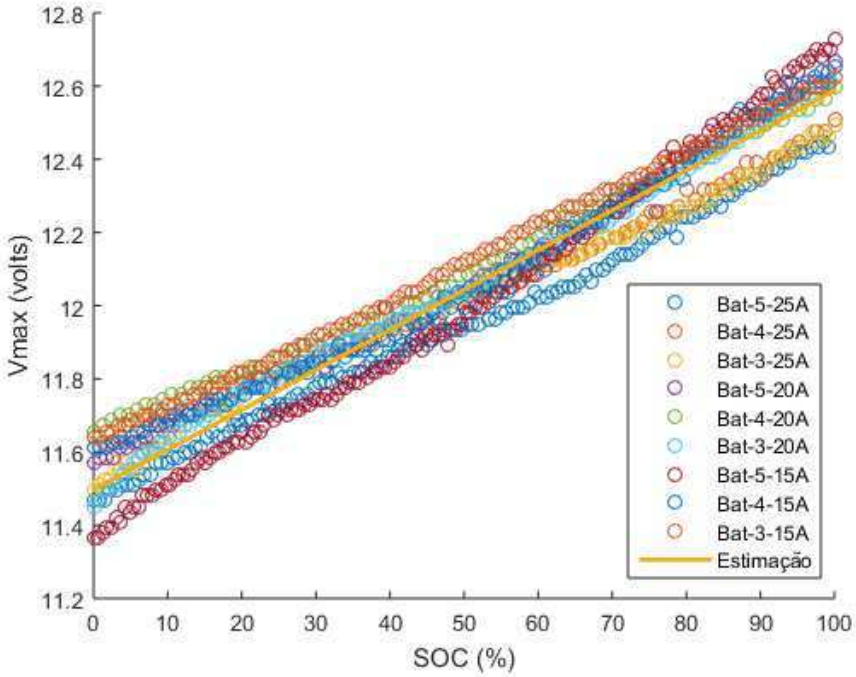

FIGURA 8 – VALORES DE V_{MAX} E ΔV_2 PARA AS NOVE DESCARGAS PULSADAS MONITORADAS EM LABORATÓRIO.

Logo, estimou-se através do método dos mínimos quadrados uma reta que descreve o valor do estado de carga em função do valor de V_{MAX}, conferindo ao modelo uma média dos erros de 5,22%. Com isso, a atividade de construção do modelo matemático de estimação do SOC para as baterias utilizadas foi finalizada.

Os testes realizados para estimar o SOH tiveram um comportamento um pouco diferente do esperado. Na Figura 9 é apresentada a relação entre ΔV_2 e C_{RATE} nos testes realizados com o intuito de desenvolver o modelo de estimação do SOH. Pode-se perceber que alguns pontos ficaram distantes da reta estimada com o método dos mínimos quadrados, conferindo um erro máximo de 19,16% e um erro médio de 8,8% ao modelo em questão. Logo, uma vez que a construção dos dois modelos foi concluída, os resultados foram repassados para os gerentes e supervisores da equipe, a fim de receber autorização para iniciar sua implementação em MATLAB/Simulink. Após algumas reuniões de discussão entre a equipe e o cliente, os resultados foram aprovados e deu-se início à implementação do modelo.

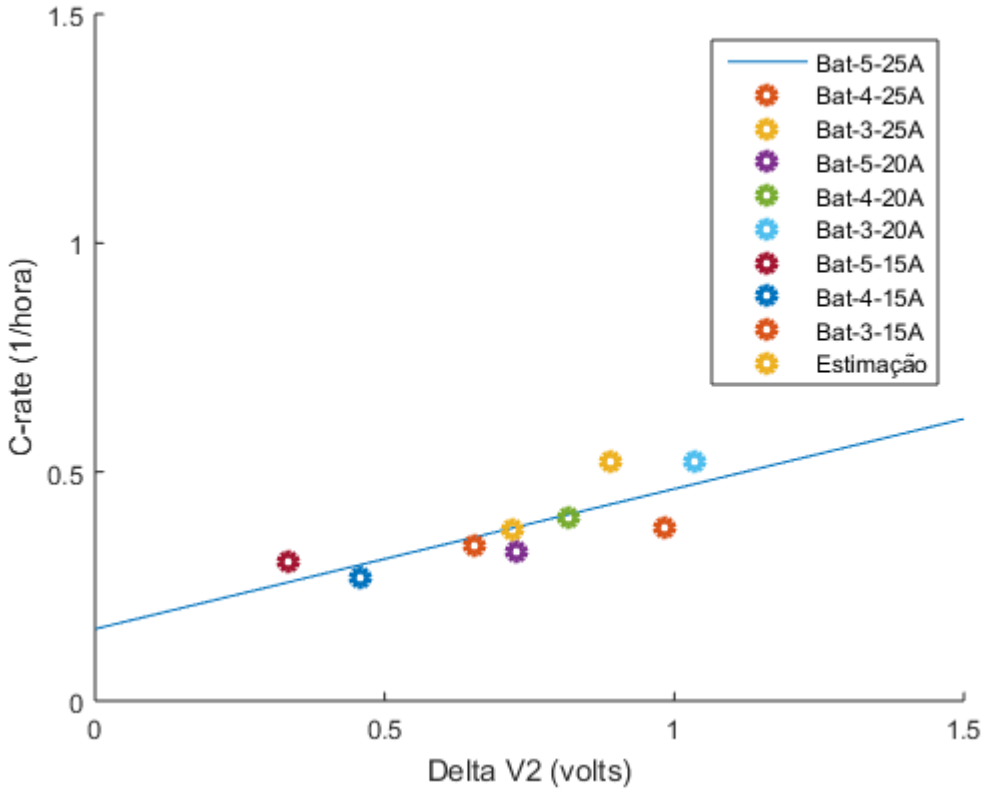

FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE C_{RATE} E ΔV_2 NOS EXPERIMENTOS DE ESTIMAÇÃO DE SOH.

4.3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO

Inicialmente, foi necessário esquematizar as funcionalidades exigidas e desejadas durante o desenvolvimento. O estagiário construiu em diagrama de blocos todo o comportamento esperado pelo método escolhido, de forma que a aplicação dos pulsos de corrente e a consequente medição de tensão para adquirir os valores necessários aos cálculos de estimação foi automatizada e controlada por meio de um microcontrolador.

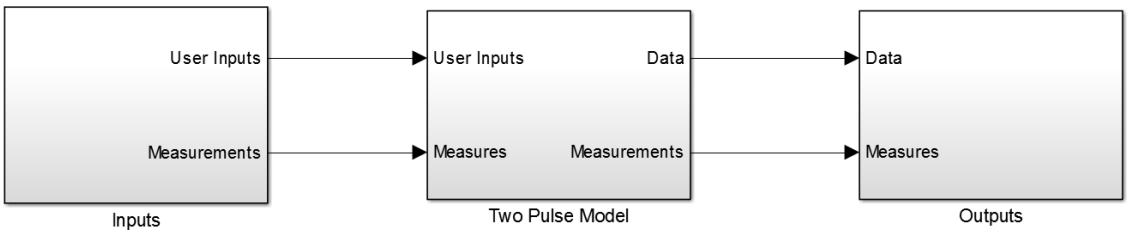

FIGURA 10 - DIAGRAMA DE BLOCOS MAIS EXTERNO EM SIMULINK DO MÉTODO IMPLEMENTADO.

Na Figura 10 é apresentada a visão mais externa do diagrama de blocos implementado. O estagiário foi solicitado para dividir o modelo em três partes: *Inputs*, *Two Pulse Model* e *Outputs*, de forma a padronizar o modelo junto aos outros modelos implementados pela equipe anteriormente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste Relatório, foram detalhadas as atividades desenvolvidas em um projeto de pesquisa e desenvolvimento como parte da disciplina de Estágio Integrado. O aluno desenvolveu suas atividades no Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva - EMBEDDED.

Devido ao cronograma do projeto, a implementação em hardware e posteriores melhoramentos do modelo apresentado aconteceram em meses posteriores ao estágio. Entretanto, o desempenho do estagiário foi satisfatório perante a equipe com a qual trabalhou.

Assim, foi cumprida a carga horária de 660 horas planejada atendendo ao máximo os objetivos propostos no início deste trabalho.

Durante o curso de graduação, o estagiário cursou algumas disciplinas que foram bastante recordadas durante o estágio, como por exemplo: Circuitos Elétricos II, Controle Analógico, Cálculo Numérico, Filtros Elétricos, Eletrônica, Análise de Sinais e Sistemas, Arquitetura de Sistemas Digitais e Sistemas de Aquisição de Dados e Interface. Por outro lado, foram exigidos do estagiário alguns conhecimentos que não foram contemplados durante o curso de graduação, como: Conhecimento intermediário no *software* MATLAB/Simulink e Funcionamento de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica.

Ainda é possível afirmar que a experiência de participar de uma equipe e de um projeto que está intimamente ligado às demandas da indústria foi muito enriquecedor, uma vez que apenas fora da sala de aula é possível atingir e conhecer a realidade da indústria. Portanto, foi possível aplicar vários dos conceitos de engenharia adquiridos durante os últimos anos, de forma a complementar a formação acadêmica do aluno.

6 BIBLIOGRAFIA

ABNT. **ABNT NBR 14199 - Acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado - Ensaios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2014. (ICS 29.220.20).

ANATEL. **Norma para Certificação e Homologação de Acumuladores Chumbo-Ácido Estacionários Regulados por Válvula para Aplicações Específicas**. Agência Nacional de Telecomunicações. 2012.

COLEMAN, M.; GERARD HURLEY, W.; K WAN LEE, C. An Improved Battery Characterization Method Using a Two-Pulse Load Test. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 23, p. 708-713, Junho de 2008.

COLEMAN, M.; LEE, C. K.; HURLEY, W. G. **State of Health Determination:** Two Pulse Load Test for VRLA Battery. 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Jeju: IEEE Press. 2006.

FREEDOM, J. C. **Manual Técnico Bateria Estacionária**. Johnson Controls. Sorocaba. 2013.

MARCHILDON, J.; DOUMBIA, M. L.; AGBOSSOU, K. **SOC and SOH Characterisation of Lead Acid Batteries**. IECON. Yokohama: IEEE Press. 2015. p. 1442-1446.

NGUYEN, T.-T.; TRAN, V.-L.; CHOI, W. **Development of the Intelligent Charger with Battery State-of-Health Estimation Using Online Impedance Spectroscopy**. Seoul: IEEE. 2014. p. 454-458.

REECE, C. **An Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)**. Jefferson Lab. 2005.

TINNEMEYER, J. **Multiple Model Systems and Methods for Testing Electrochemical Systems**. US 6.778.913, 17 de Agosto de 2004.