

155502000

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Avaliação do estado de carga de baterias chumbo-
ácidas por espectroscopia de impedância
eletroquímica.**

Autor: José Rocha Andrade da Silva

Orientador: Célia Marina de Alvarenga Freire

100/2000

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR José Rocha Andrade
da Silva E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 27. 10 2000

Célia Marina de Alvarenga Freire
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Avaliação do estado de carga de baterias chumbo-
ácidas por espectroscopia de impedância
eletroquímica.**

**Autor: José Rocha Andrade da Silva
Orientador: Célia Marina de Alvarenga Freire**

**Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação**

Tese de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Campinas, 2000.
S.P. - Brasil.**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

UNIDADE BC
 N.º CHAMADA: UNICAMP
Si38a
 V. 47389
 TOMBO BC 837102
 PROC. 837102
 C ☐ D ☒
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA 04/02/02
 N.º CPD

CM00163075-8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38a Silva, José Rocha Andrade da.
 Avaliação do estado de carga de baterias chumbo-ácidas
 por espectroscopia de impedância eletroquímica / José
 Rocha Andrade da Silva. --Campinas, SP: [s.n.]; 2000.

Orientadora: Célia Marina de Alvarenga Freire.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Espectroscopia de impedância. 2. Eletroquímica. 3.
 Baterias elétricas -- Manutenção e reparos. I. Freire,
 Célia Marina de Alvarenga. II. Universidade Estadual
 de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

TESE DE MESTRADO

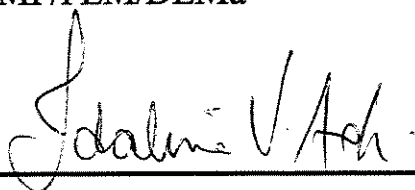
**Avaliação do estado de carga de baterias chumbo-ácidas por
espectroscopia de impedância eletroquímica.**

Autor: José Rocha Andrade da Silva

Orientador: Célia Marina de Alvarenga Freire



Profa. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire
UNICAMP/FEM/DEMa



Profa. Dra. Idalina Vieira Aoki
POLI/USP/DEQ



Profa. Dra. Maragarita Ballester
UNICAMP/FEM/DEMa

Campinas, 27 de Outubro de 2000

Dedicatória

A águia empurra seus filhotes para a beira do ninho. Seu coração maternal se acelera com as emoções conflitantes, ao mesmo tempo em que ela sente a resistência dos filhotes aos seus persistentes cutucões: "Por que a emoção de voar tem que começar com o medo de cair?", ela pensou. Esta questão secular ainda não estava respondida para ela...

Como manda a tradição da espécie, o ninho estava localizado bem no alto de um pico rochoso, nas fendas protetoras de um dos lados dessa rocha. Abaixo dele, somente o abismo e o ar para sustentar as asas dos filhotes. "E se justamente agora isto não funcionar?", ela pensou.

Apesar do medo, a águia sabia que aquele era o momento. Sua missão maternal estava preste a se completar. Restava ainda uma tarefa final... O empurrão.

A águia tomou-se da coragem que vinha de sua sabedoria interior. Enquanto os filhotes não descobrirem suas asas, não haverá propósito para sua vida. Enquanto eles não aprenderem a voar, não compreenderão o privilégio de que é nascer uma águia. O empurrão era o maior presente que ela podia oferecer-lhes. Era seu supremo ato de amor. E então, um a um, ela os precipitou para o abismo... E eles voaram!¹

Dedico o final de mais esta etapa de minha vida profissional, à Suprema Inteligência que rege o Universo. Somente quem conhece todos os desígnios universais, pode empurrar-me com tremenda Sabedoria. Todas as vezes que fui divinamente empurrado, eu consegui voar.

José Rocha Andrade da Silva

¹ A Fábula da Águia aparece em muitos livros, porém essa versão foi extraída do livro "Qualidade começa em mim", escrito pelo Dr. Tom Chung (Maltese, 4ª Ed., 1996).

Agradecimentos

Quero agradecer à Profa. Dra. Célia Marina Alvarenga Freire, pela paciência e persistência que demonstrou, ao me incentivar no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, também, à Claudia Souto Cattani Aoki, à Maria de Fátima N. C. Rosolem e ao Francisco Siqueira de Souza, pelos incentivos e oportunas discussões.

E, além de agradecer, quero registrar que estou consciente de que o tempo que investi na realização deste trabalho não era meu. O tempo que dediquei a este trabalho foi tirado, principalmente, das pessoas que me querem bem e que ficaram privadas de minha companhia durante os muitos momentos de isolamento, que precisei para a elaboração desta dissertação. A essas pessoas, pela compreensão que demonstraram, eu gostaria de expressar meu eterno agradecimento.

José Rocha Andrade da Silva

Apresentação

Esta dissertação apresenta as bases teóricas, dados práticos, discussão e conclusões do estudo realizado, com o objetivo principal de verificar as relações entre os parâmetros eletroquímicos de uma bateria chumbo-ácida, com seu estado-de-carga, verificando a possibilidade de se estabelecer a quantidade de carga disponível nessa bateria, a partir do conhecimento desses parâmetros.

Durante seu desenvolvimento são utilizados termos técnicos próprios da área de acumuladores, que não são de uso corrente dos especialistas em eletroquímica, por esse motivo esses termos estão definidos no Anexo 1.

Sumário

Lista de figuras	i
Lista de anexos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
I. Introdução	1
1. Objetivos e justificativas	1
2. Referências bibliográficas do Capítulo I	4
II. Fundamentos teóricos sobre baterias	5
1. Definição	5
2. Princípio de operação das baterias chumbo-ácidas	5
2.1. Potencial elétrico da placa positiva	7
2.2. Potencial elétrico da placa negativa	7
2.3. Potencial nominal da bateria chumbo-ácida	8
3. Tipos de baterias chumbo-ácidas	8
3.1. Acumuladores chumbo-ácidos estacionários	10
3.2. Acumuladores chumbo-ácidos tracionários	11
3.3. Acumuladores chumbo-ácidos de partida	11
4. Referências bibliográficas do Capítulo II	11
III. A técnica de impedância eletroquímica	12
1. Introdução	12
2. Análise dos dados	16
2.1. Gráficos qualitativos: Nyquist e Bode	16
2.2. Gráficos quantitativos	18
3. Referências bibliográficas do Capítulo III	20
IV. A técnica de impedância eletroquímica aplicada ao estudo de baterias	21
1. Introdução	21
2. Variáveis que influenciam nos valores de impedância das baterias	22

2.1.	Efeitos do nível de carga sobre os valores de impedância da bateria	22
2.2.	Efeitos da temperatura sobre os valores de impedância da bateria	23
3.	Métodos para a determinação dos valores de impedância de baterias	26
3.1.	Métodos práticos para a determinação da impedância de baterias	27
4.	Referências bibliográficas do Capítulo IV	28
V.	Materiais e métodos	30
1.	Introdução	30
2.	Caracterização da bateria ensaiada	30
2.1.	Características construtivas	30
2.2.	Características nominais de descarga	31
2.3.	Capacidade real da bateria	32
2.4.	Variação da densidade do eletrólito em função do estado-de-carga	34
2.5.	Espectroscopia de impedância eletroquímica	34
3.	Referências bibliográficas do Capítulo V	35
VI.	Dados obtidos	36
1.	Introdução	36
2.	Capacidade real da bateria	36
3.	Variação da densidade do eletrólito em função do estado-de-carga	37
4.	Espectroscopia de impedância eletroquímica	38
4.1.	dados experimentais	38
4.2.	Tratamento dos dados e modelo matemático	42
5.	Referências bibliográficas do Capítulo VI	51
VII.	discussão dos resultados	52
1.	Introdução	52
2.	Teste do modelo matemático	52
3.	Análise das correlações dos parâmetros eletroquímicos com o estado-de-carga	61
4.	Referências bibliográficas do Capítulo VII	67
VIII.	Conclusões	68
1.	Conclusões	68
1.1.	Modelo utilizado para análise dos dados	68
1.2.	Correlações entre os parâmetros eletroquímicos com o estado-de-carga	68
IX.	Sugestões para estudos futuros	70

Lista de figuras

I.1 – Esquema de alimentação de uma central telefônica	2
II.1 – Bateria chumbo-ácida de Planté	6
III.1 – Diferentes formatos de curvas corrente-potencial	13
III.2 – Valores de impedância em um plano complexo	15
III.3 – Exemplo de um circuito eletrônico equivalente de uma semicélula eletroquímica	15
III.4 – Exemplos de gráficos de Nyquist e Bode	17
III.5 – Circuito eletrônico equivalente de Randles	18
III.6 – Exemplos de gráficos quantitativos	20
IV.1 – Variação da impedância interna com o estado-de-carga da bateria	23
IV.2 – Relação entre valores de impedância de baterias VRLA contra temperatura ambiente	24
IV.3 – Variação com a temperatura ambiente dos valores de impedância de baterias VRLA	25
IV.4 – Variação dos valores de impedância de baterias VRLA com a temperatura ambiente	26
IV.5 – Diagramas de Nyquist para uma mesma célula, usando como sinais de entrada: a) Sinal randômico e b) Ruído de fundo de uma central telefônica	28
V.1 – Desenho esquemático do monobloco NIFE-TM de dois elementos	31
V.2 – Curva nominal de descarga para o elemento NIFE-TM, regime C10	32
V.3 – Sistema elétrico para procedimento de carga	33
V.4 – Sistema elétrico para procedimento de descarga	34
V.5 – Esquema elétrico para determinação dos dados de impedância	35
VI.1 – Curva de descarga em 0,2 de C10	36
VI.2 – Densidade do eletrólito em função do estado-de-carga	37
VI.3 – Valores médios do módulo da impedância pela frequência para alguns estados-de-carga	41
VI.4 – valores médios dos ângulos de mudança da fase pela frequência para alguns estados-de-carga	42
VI.6 – Relação da resistência em paralelo (R_p) com a frequência para $S = 100\%$	47
VI.7 - Relação da resistência em paralelo (R_p) com a frequência para $S = 53,13\%$	47
VI.8 - Relação da resistência em paralelo (R_p) com a frequência para $S = 0\%$	48
VI.9 - Relação da resistência em série (R_s) com a frequência para $S = 100\%$	48
VI.10 - Relação da resistência em série (R_s) com a frequência para $S = 62,13\%$	49

VI.11 - Relação da resistência em série (R_s) com a frequência para $S = 0\%$	49
VI.12 - Relação da capacitância em série (C_s) com a frequência para $S = 100; 53,13; 6,25\%$	50
VI.13 - Relação da capacitância em paralelo (C_p) com a frequência para $S = 100; 53,13; 6,25\%$	50
VII.1 - Circuito equivalente de Warburg para uma bateria	53
VII.2 - Circuito equivalente simplificado para uma bateria	53
VII.3 - $(1/\omega C_s) \times R_s$ para $S = 100\%$	56
VII.4 - $(1/\omega C_s) \times R_s$ para $S = 62,5\%$	57
VII.5 - $(1/\omega C_s) \times R_s$ para $S = 6,25\%$	58
VII.6 - $C_s \times (\omega^2)$ para $S = 100; 62,5$ e $6,25\%$	58
VII.7 - Modelo de transmissão de linha de um poro em um eletrodo poroso	59
VII.8 - $C_s \times (1/\omega^{3/4})$ para $S = 100\%$	60
VII.9 - $C_s \times (1/\omega^{3/4})$ para $S = 62,5\%$	60
VII.10 - $C_s \times (1/\omega^{3/4})$ para $S = 6,25\%$	61
VII.11 - Estado-de-carga pelo ângulo de mudança da fase em $f = 0,1$ Hz	62
VII.12 - Estado-de-carga pelo ângulo de mudança da fase em $f = 1$ Hz	63
VII.13 - Estado-de-carga pelo ângulo de mudança da fase em $f = 10$ Hz	63
VII.14 - Estado-de-carga pela capacitância em série para $f = 0,1$ Hz	64
VII.15 - Estado-de-carga pela capacitância em série para $f = 1$ Hz	64
VII.16 - Estado-de-carga pela capacitância em série para $f = 10$ Hz	65
VII.17 - Estado-de-carga pela capacitância em paralelo para $f = 0,1$ Hz	65
VII.18 - Estado-de-carga pela capacitância em paralelo para $f = 1$ Hz	66
VII.19 - Estado-de-carga pela capacitância em paralelo para $f = 10$ Hz	66

Lista de anexos

Anexo I: Glossário de termos técnicos

Anexo II: Dados obtidos

Resumo

Silva, José Rocha Andrade, “**Avaliação do estado de carga de baterias chumbo-ácidas por espectroscopia de impedância eletroquímica**”, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 84p. Tese (Mestrado).

Os acumuladores de energia estacionários devem ser periodicamente avaliados quanto à sua capacidade de carga, visando assegurar que sua energia acumulada poderá ser prontamente utilizada, quando das falhas do sistema de alimentação convencional. Normalmente, essas avaliações são realizadas através dos testes de capacidade, que apresentam como principais desvantagens, o fato do banco de baterias permanecer indisponível, durante a realização do teste, e o desperdício da energia acumulada nas baterias.

Neste trabalho é avaliada a potencialidade do método de espectroscopia de impedância eletroquímica como ferramenta na determinação do estado-de-carga de baterias chumbo-ácidas, através da análise das relações dos seus parâmetros eletroquímicos e sua quantidade de carga armazenada.

Palavras Chaves: Espectroscopia de impedância eletroquímica, estado-de-carga de acumuladores, baterias chumbo-ácidas.

Abstract

Silva, José Rocha Andrade, “**Evaluation of Lead-acid batteries’ state-of charge by electrochemical impedance spectroscopy**”, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 84p. Tese (Mestrado).

Stationary lead-acid batteries must have their charge capacity periodically evaluated in order to assure that they are ready to supply energy during conventional supplier faults. Normally, these evaluations are conducted by capacity tests, which present these main disadvantages: batteries remain unavailable while tests are conducted and total energy accumulated in batteries is dissipated during the tests.

In this work electrochemical impedance spectroscopy is evaluated as a tool to assess the lead-acid batteries’ state-of-charge, by analysing the co-relations between battery electrochemical parameters and its stored energy.

Key Words: Electrochemical impedance spectroscopy, state-of-charge of batteries, lead-acid batteries.

Capítulo I

Introdução

1. Objetivos e justificativas

Com a evolução da eletrônica e informática, os equipamentos eletrônicos têm sido responsáveis por proporcionar ao ser humano maior segurança e comodidade. Por este motivo vêm assumindo cada vez mais importância na vida cotidiana, chegando a ponto de, em muitos casos, terem de operar de forma isenta de falhas e sem interrupções. Como exemplo podem ser citados os equipamentos hospitalares, de telecomunicações e de segurança.

Para que esses equipamentos possam operar ininterruptamente é necessário garantir fontes de alimentação confiáveis, tornando-se de grande importância manter reservas de energia que possam ser prontamente liberadas, no caso de interrupções no sistema de alimentação convencional.

Nesses sistemas de reserva de energia são utilizadas baterias com grande capacidade de armazenamento de carga, do tipo estacionárias, que devem permanecer carregadas e prontas para liberarem energia imediatamente após a falha do sistema de alimentação convencional e garantirem o funcionamento dos equipamentos, enquanto a alimentação convencional não for restabelecida.

Em um sistema de telecomunicações, por exemplo, as funções de uma bateria vão além de possibilitar que os equipamentos continuem em operação após a interrupção da alimentação convencional. Suas funções incluem ainda:

- Filtrar ruídos elétricos produzidos por grupo motor-gerador, ou outras fontes de energia;
- Suprir as solicitações de corrente que temporariamente excedam a capacidade de fornecimento da fonte convencional;
- Absorver picos de tensão antes que prejudiquem o desempenho dos equipamentos de telecomunicações.

A figura I.1 apresenta esquematicamente o sistema de alimentação de uma central telefônica. [SOUZA, 1999]

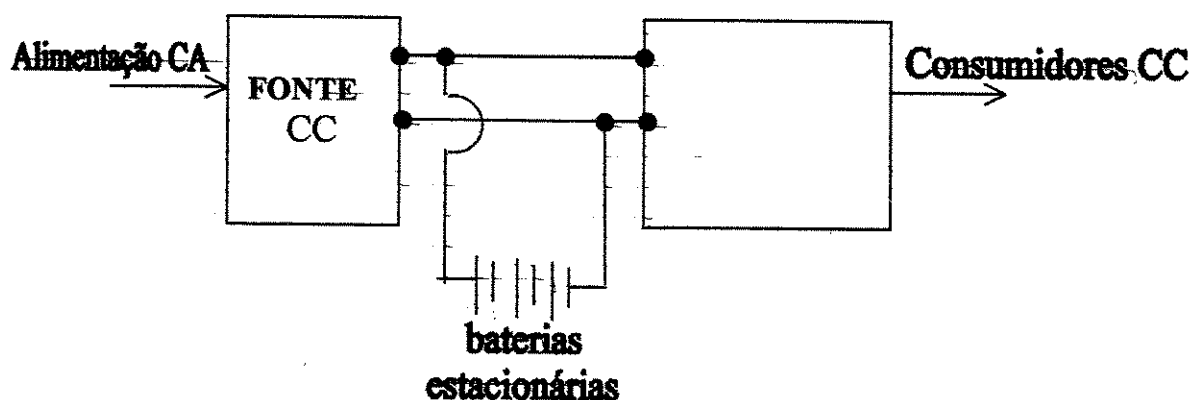


Fig.1.1: Esquema de alimentação de uma central telefônica. [SOUZA, 1999]

Na realidade uma bateria é um sistema eletroquímico delicado e complexo, que está constantemente em estado de mudança e sujeito a danos.

Em uma bateria chumbo-ácida, por exemplo, o eletrólito pode estratificar e processos corrosivos podem danificar os pólos, grades e barras coletoras. Como consequência do processo de operação da bateria, as placas se alteram e tanto altas como baixas temperaturas influenciam na sua vida útil.

Dessa forma, devido à importância desses sistemas de suprimento de energia e ao caráter imprevisível das solicitações às quais são submetidos, as baterias estacionárias devem ser periodicamente testadas quanto ao seu estado-de-carga e quanto à sua capacidade de armazenamento. Outra informação de grande utilidade é a previsão do final da vida útil do sistema, que permite a substituição antecipada das baterias, evitando riscos de paralisação dos equipamentos, porém garantindo que a substituição não ocorra precocemente, buscando a melhor relação custo/benefício.

Usualmente a avaliação do estado-de-carga de uma bateria é feita através da medida da tensão elétrica em circuito aberto ou da densidade do eletrólito, porém, especialmente no caso das baterias chumbo-ácidas, o potencial em circuito aberto varia de bateria para bateria, para um mesmo estado-de-carga. Segundo *Gopikanth e colaboradores* [GOPIKANTH, 1979] este fato se deve às diferentes formas de cristalização e ao grau de não estequiometria na formação de PbO_2 e $PbSO_4$ na massa ativa dos eletrodos. Também, com o advento das baterias reguladas por válvulas (normalmente conhecidas por seladas), as medidas de densidade do eletrólito deixam de ser possíveis.

Devido à imprecisão dos métodos da medida de tensão em circuito aberto e da densidade do eletrólito, a avaliação da capacidade de armazenamento de uma bateria normalmente é realizada através da determinação da quantidade de energia acumulada, quando esta se encontra em plena carga. O

método consiste em levar o acumulador ao seu estado de plena carga e, em seguida, através de um banco de resistências conhecidas, descarregá-lo até seu instante final de descarga. Dessa forma a quantidade de energia que estava armazenada pode ser conhecida a partir do tempo de descarga.

Os testes de capacidade realizados segundo esse procedimento, apresentam como inconveniente o fato do sistema de suprimento de energia permanecer não disponível durante a execução do teste, impossibilitando sua utilização em caso de falhas do sistema de alimentação convencional. O método também demanda muito tempo e representa um desperdício de energia, uma vez que a carga armazenada no acumulador é toda consumida no teste.

Como os princípios de funcionamento das baterias são basicamente químicos e eletroquímicos, as técnicas eletroquímicas são úteis para sua avaliação durante os processos de carga e descarga e na detecção de falhas internas, que podem comprometer seu desempenho.

Em comparação às outras técnicas, a técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS) apresenta grandes vantagens, quando usada na avaliação de baterias, podendo proporcionar importantes informações, tais como [SHLH,1996]:

- Determinação do estado-de-carga;
- Estudo de mecanismos de reação;
- Avaliação de separadores;
- Comportamento de filmes passivantes;
- Investigação de cinéticas de eletrodos, permitindo estudar separadamente cada semicélula;
- Identificação dos processos corrosivos que ocorrem nos eletrodos.

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a aplicação da técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica na avaliação de baterias, com os seguintes objetivos:

- Aprendizado sobre os princípios da técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS);
- Aplicação da técnica EIS em baterias chumbo-ácidas ventiladas para telecomunicações;
- Aquisição de dados em baterias chumbo-ácidas ventiladas para telecomunicações;

- Conhecer o potencial da técnica EIS, como método de avaliação do nível de carga de baterias chumbo-ácidas.

2. Referências bibliográficas do capítulo I

[SOUZA, 1999] “Princípios de funcionamento e procedimentos de operação e manutenção de acumuladores elétricos” Souza, F. S. e Rosolem, M. F. N. C., Apostila CPqD, pp 4, 1999.

[GOPIKANTH, 1979] “Impedance parameters and the state-of-charge. II. Lead-acid battery” Gopikanth M. L. e Sathyanarayana S., Journal of Applied Electrochemistry, vol. 9, pp 371, 1979.

[SHLH, 1996] “Electrochemical Impedance Spectroscopy for Battery Research and Development” Technical Report 31; Shlh H. e Lo T.; Solartron, 1996.

Capítulo II

Fundamentos teóricos sobre baterias

1. Definição

Para o desenvolvimento desta dissertação define-se que: bateria, acumulador, ou célula eletroquímica é um dispositivo eletroquímico que converte energia elétrica em energia química, armazenando-a para posterior restituição em forma de energia elétrica.

2. Princípio de operação das baterias chumbo-ácidas

Por definição, o potencial padrão de uma célula eletroquímica é calculado como sendo a diferença entre os valores do potencial da semi-célula que recebe os elétrons e o potencial da semi-célula que doa elétrons, tomados em relação à semi-célula padrão de hidrogênio [GENTIL,1983], de acordo com a equação II.1.

$$P = P_c - P_a \quad \text{Equação II.1}$$

Onde:

$P \Rightarrow$ Potencial da célula eletroquímica;

$P_c \Rightarrow$ Potencial da semicélula que recebe elétrons;

$P_a \Rightarrow$ Potencial da semicélula que doa elétrons.

A bateria chumbo-ácida constitui-se de pelo menos uma célula eletroquímica, formada por placa de peróxido de chumbo (placa positiva) e outra de chumbo metálico (placa negativa), ambas imersas em uma solução aquosa de ácido sulfúrico, que funciona como eletrólito.

Planté, em 1860, sessenta anos após a invenção da pilha galvânica por Volta, apresentou à Academia Francesa de Ciências a primeira bateria chumbo-ácida, constituída de nove elementos, cada um com duas placas enroladas sob a forma de espiral e isoladas por meio de um separador de borracha, como ilustra a Figura II.1. [SOUZA,1999]

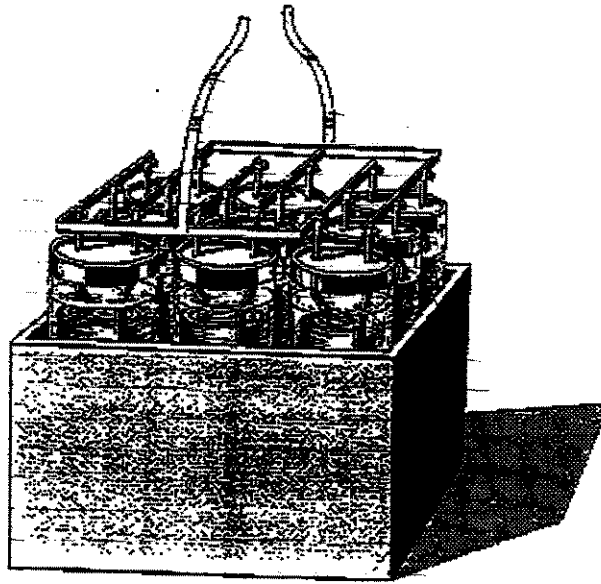
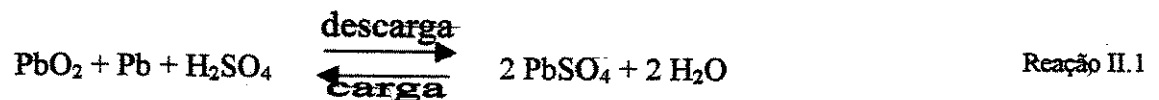


Fig. II. 1: Bateria chumbo-ácida de Planté. [SOUZA, 1999]

Em 1882 Gladstone e Tribe lançaram a teoria da dupla sulfatação, para explicar o processo químico de operação do acumulador chumbo-ácido. Por essa teoria, durante a operação de descarga, o sulfato de chumbo (PbSO_4) é formado em ambas as placas, sendo revertido nas matérias ativas das placas durante a operação de carga. Conforme mostrado pela seguinte reação química de equilíbrio [SOUZA, 1999]:

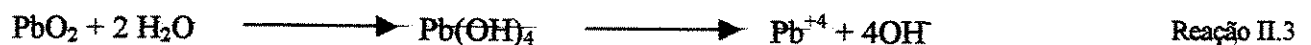


Antes da descarga do acumulador a matéria ativa na placa negativa é chumbo esponjoso e na placa positiva é peróxido de chumbo.

Devido à interação do eletrólito com a massa ativa da placa negativa, ioniza-se uma certa quantidade de átomos de chumbo que passa para o eletrólito como Pb^{+2} , deixando na placa dois elétrons por átomo de chumbo ionizado. Desta forma a placa negativa carrega-se negativamente em relação ao eletrólito, conforme a reação química a seguir:



Simultaneamente o PbO_2 da placa positiva reage com a água formando Pb^{+4} , conforme indicado pela Reação II.3:

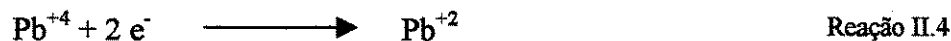


A presença de íons Pb^{+4} carrega a placa positivamente em relação ao eletrólito.

Os estados-de-carga das placas positiva e negativa geram uma diferença de potencial elétrico, que é calculado segundo a lei de Faraday [GENTIL, 1983], como indicado a seguir:

2.1. Potencial elétrico da placa positiva

Na placa positiva as reações parciais que ocorrem são as seguintes:



A Reação II.4 apresenta um potencial padrão de equilíbrio de + 1,75 V [GENTIL, 1983], na temperatura de referência. Levando-se em conta a concentração dos íons metálicos², tem-se:

$$P_c = 1,75 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{[\text{Pb}^{+4}]}{[\text{Pb}^{+2}]} \quad \text{Equação II.2}$$

$$P_c = 1,69 \text{ V}$$

Onde:

$P_c \Rightarrow$ potencial elétrico da placa positiva

$R \Rightarrow$ constante universal dos gases

$T \Rightarrow$ temperatura absoluta

$F \Rightarrow$ constate de Faraday

2.2. Potencial elétrico da placa negativa

Na placa negativa, a Reação II.2 apresenta o potencial de equilíbrio de - 0,12 V [GENTIL, 1983], também na temperatura de referência.

Da mesma forma que para a placa positiva, tem-se:

$$P_a = -0,12 - \frac{RT}{2F} \ln [\text{Pb}^{+2}] \quad \text{Equação II.3}$$

² Para maior precisão o potencial eletroquímico é definido a partir da disponibilidade iônica efetiva na solução, determinada através da atividade iônica (gentil, 1983, p.22-23). Com o objetivo de simplificar os cálculos, nesta dissertação é considerada apenas a concentração iônica total no eletrólito.

$$P_a = -0,36 \text{ V}$$

Onde:

$P_a \Rightarrow$ potencial elétrico da placa negativa.

2.3. Potencial nominal da bateria chumbo-ácida

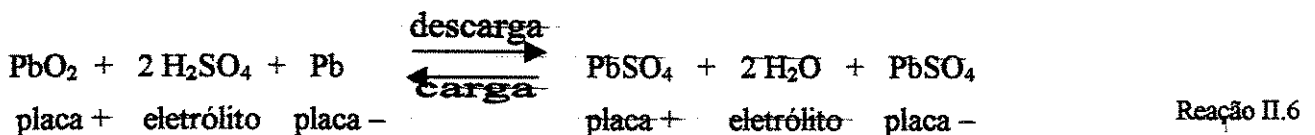
Substituindo-se os valores resultantes das Equações II.2 e II.3 na Equação II.1, a diferença de potenciais obtida em cada elemento de uma bateria chumbo-ácida, na temperatura de referência é:

$$P = P_c - P_a$$

$$P = 2,05 \text{ V}$$

Convencionou-se, por tanto, o valor de 2,0 V como potencial nominal para cada elemento de uma bateria chumbo-ácida.

O mecanismo eletroquímico acima pode ser resumido pela equação abaixo:



Observando-se a Reação II.6, conclui-se que:

- Durante o processo de carga do acumulador a quantidade de água do eletrólito diminui, enquanto a quantidade de ácido sulfúrico aumenta. Devido a isso ocorre o aumento da densidade do eletrólito durante a carga, até que todo o sulfato de chumbo das placas transforma-se em massa ativa;
- Ao término da transformação de todo o sulfato de chumbo em massa ativa, a diferença de potenciais entre os pólos positivo e negativo atinge o valor máximo e permanece constante;
- Após o término do processo de carga, toda energia elétrica cedida à bateria é utilizada para decompor a água do eletrólito, resultando em hidrogênio e oxigênio.

3. Tipos de baterias chumbo-ácidas

A evolução da eletrônica tem provocado uma crescente procura por novas tecnologias de baterias, que buscam, principalmente, armazenar maiores quantidades de energia no menor volume possível, dentro da melhor relação custo/benefício. Outro aspecto a ser considerado relaciona-se com a

necessidade cada vez maior das baterias coexistirem, em um mesmo ambiente, com equipamentos eletrônicos de alta confiabilidade, tornando praticamente proibitiva a emissão de gases, pela bateria.

Atualmente existem diferentes tecnologias de acumuladores disponíveis no mercado, tais como, as baterias níquel-cádmio seladas, as baterias de lítio, as de polímeros condutores e as de alta energia, porém as baterias chumbo-ácidas ainda apresentam a melhor relação custo/benefício, na maioria das aplicações.

As tecnologias empregadas nos acumuladores chumbo-ácidos podem ser divididas em dois grupos principais:

- Acumuladores chumbo-ácidos ventilados;
- Acumuladores chumbo-ácidos regulados por válvulas.

As diferenças básicas entre esses grupos são as seguintes: [SOUZA,1999]

- **Forma do eletrólito:** Nas baterias ventiladas o eletrólito é líquido e encontra-se livre em seu interior, enquanto as baterias reguladas por válvulas apresentam o eletrólito imobilizado, podendo estar adsorvido em um sólido suporte ou gelificados;
- **Recombinação dos gases gerados:** Um dos inconvenientes das baterias chumbo-ácidas é a produção dos gases hidrogênio e oxigênio, devido à eletrólise da água durante a sobrecarga. Nas baterias ventiladas esses gases são lançados no ambiente, o que leva ao consumo de água, devendo a mesma ser repostada periodicamente. Além disso, a saída dos gases do interior da bateria arrasta pequenas quantidades de eletrólito, o que pode causar problemas de corrosão nos equipamentos consumidores. Este fato praticamente inviabiliza o compartilhamento de um mesmo ambiente pelas baterias chumbo-ácidas ventiladas e equipamentos eletrônicos.

Nas baterias reguladas por válvulas, a maior parte dos gases produzidos é recombinada em seu interior, formando água novamente. Essa capacidade de recombinação, aliada à imobilidade do eletrólito, possibilita que essas baterias operem em qualquer posição e convivam com os equipamentos consumidores, sem causar-lhes danos. Porém falhas no processo de recombinação podem gerar alta pressão interna, o que prejudica o funcionamento da bateria, além de poder causar a explosão do vaso. Como prevenção, essas baterias são equipadas com válvulas de segurança.

Dependendo da finalidade, os acumuladores chumbo-ácidos podem ser do tipo estacionário, tracionário ou de partida (arranque). [SOUZA, 1999]

3.1. Acumuladores chumbo-ácidos estacionários

Acumuladores chumbo-ácidos estacionários são projetados para operação em locais fixos, podendo ser diferenciados de acordo com sua aplicação, em acumuladores para telecomunicações, sistemas fotovoltaicos e sistemas de corrente alternada ininterrupta (*no breaks*).

Basicamente esses tipos de acumuladores chumbo-ácidos estacionários diferenciam-se pela espessura das placas (quantidade de massa ativa) e pelo volume e densidade do eletrólito, como descrito a seguir:

- **Baterias para telecomunicações:** Têm como característica construtiva principal a espessura das placas (quantidade de massa ativa), que são projetadas para fornecerem quantidades razoáveis de energia, por um período relativamente longo. A densidade do eletrólito, quando em plena carga, é de 1210 g/dm^3 . Permanecem a maior parte do tempo em carga de flutuação e sua capacidade nominal é normalmente definida para 10 horas.
- **Baterias para sistemas fotovoltaicos:** As características principais são a grande espessura das placas, que são dimensionadas para suportar descargas profundas, e um grande volume de eletrólito, com densidade entre 1250 e 1300 g/dm^3 , quando em plena carga. Essas baterias não permanecem em carga de flutuação, e realizam ciclos freqüentes de carga e descarga. Normalmente seu valor nominal de capacidade é definido para 500 horas.
- **Baterias para sistemas de corrente alternada ininterrupta:** São projetadas para sustentar o consumidor apenas durante o período entre a falha do fornecimento de energia convencional e, por exemplo, a partida de um grupo motor gerador ou providências rápidas para preservar dados em computadores (de 15 a 60 minutos). Essas baterias são utilizadas como suprimentos de energia durante períodos relativamente curtos, para equipamentos que solicitam corrente elevada. Por esse motivo caracterizam-se pela reduzida espessura de suas placas, apropriadas para suportar grandes picos de corrente. A densidade do eletrólito é de 1210 g/dm^3 , quando em plena carga.

3.2. Acumuladores chumbo-ácidos tracionários

Os acumuladores chumbo-ácidos tracionários são utilizados em empilhadeiras, carrinhos de golfe e locomotivas de minas, entre outros usos. Têm como característica principal o uso de placas grossas, que permitem uma autonomia de descarga de 5 a 8 horas. O eletrólito tem densidade que varia entre 1210 e 1270 g/dm³, quando em plena carga. Essas baterias têm sua temperatura de referência em 30° C e funcionam em regime de freqüentes ciclos de carga e descarga, com tensão final de descarga de 1,70 V por elemento.

3.3. Acumuladores chumbo-ácidos de partida

Os acumuladores chumbo-ácidos de partida têm como principal característica as placas extremamente finas (espessura entre 1 e 2,5 mm), projetadas para fornecerem correntes muito altas (de 300 a 3000 A), por períodos muito curtos (de 1 a 10 segundos). O eletrólito em plena carga apresenta densidade entre 1210 e 1250 g/dm³.

4. Referências bibliográficas do Capítulo II

[SOUZA, 1999] “Princípios de funcionamento e procedimentos de operação e manutenção de acumuladores elétricos” Souza, F. S. e Rosolem, M. F. N. C., Apostila CPqD, pp 8, 26, 1999.

[GENTIL, 1983] “Corrosão”, Gentil, V., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 2ª Ed., pp 20-64, 1983.

Capítulo III

A técnica de impedância eletroquímica

1. Introdução

Um eletrodo imerso em um eletrólito forma uma semicélula onde ocorrem reações físico-químicas com diferentes graus de complexidade. Sempre que ocorrerem transferências de carga elétrica na interface entre o eletrodo e o eletrólito, as técnicas eletroquímicas podem ser usadas como ferramenta para estudar o fenômeno. Nestes casos, a polarização da semi-célula através de, por exemplo, a imposição de um potencial elétrico, induz uma resposta do sistema na forma de uma corrente elétrica. Esta é a base das técnicas eletroquímicas, onde todas as grandezas que estabelecem o estado na interface (temperatura, pressão, área, etc.) são mantidas constantes e apenas a variação de uma das grandezas elétricas (corrente ou potencial) é observada, enquanto a outra é usada para perturbar o sistema.

Nas técnicas eletroquímicas os potenciais são medidos e indicados tomando-se como referência eletrodos padrões, como por exemplo, o eletrodo de calomelano saturado (SCE). Desde que não ocorra fluxo de corrente através do eletrodo de referência, a composição do mesmo não varia durante o experimento e seu potencial é constante e conhecido. Desta forma, qualquer modificação na polarização da célula resulta em uma modificação do potencial entre a entidade estudada (eletrodo de trabalho) e o seu meio (eletrólito).

Como as transferências de carga na interface entre o eletrodo e o eletrólito obedecem à lei de Faraday, esses fenômenos são chamados de faradaicos.

A técnica básica empregada para estudar fenômenos eletroquímicos faradaicos é colocar em um gráfico a relação entre a corrente e o potencial, como ilustra a Figura III.1. Esse gráfico mostra dois domínios diferentes:[GABRIELLI, 1990]

- A região de correntes catódicas devidas à redução do eletrólito (normalmente a água ou espécies da solução, como por exemplo a deposição de metais);
- A região de correntes anódicas devida à oxidação de componentes do eletrólito ou do eletrodo, como por exemplo, a dissolução metálica.

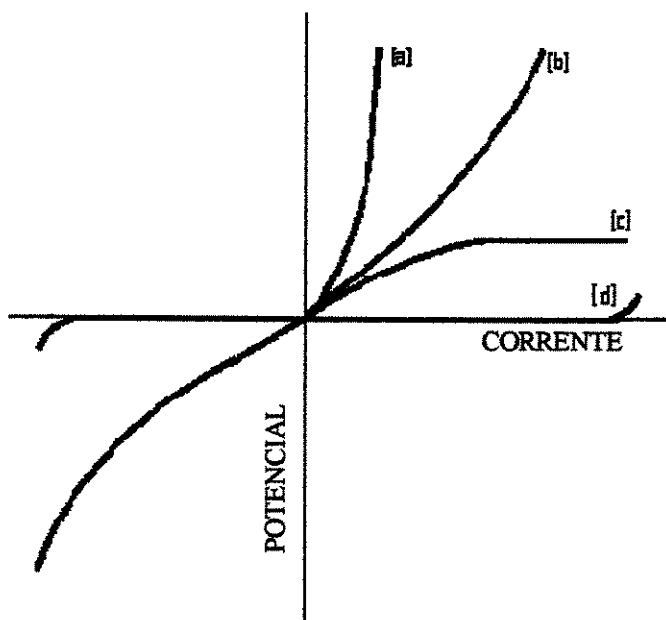


Fig. III.1: Diferentes formatos de curvas corrente-potencial. [GABRIELLI, 1990]

Para se estudar um sistema eletroquímico através da relação corrente-potencial, é necessário controlar uma dessas variáveis. Qual variável deve ser controlada depende das características eletroquímicas da semicélula.

Por exemplo, um sistema eletroquímico que se comporte de acordo com a curva (b) da Figura III.1, mostrando uma etapa onde a corrente aumenta rapidamente, com pequenos acréscimos no potencial, pode ser melhor estudado através do controle da corrente (galvanostático). O controle do potencial (potenciostático) é recomendado para estudar os sistemas que se comportam conforme descritos pelas curvas (a), (c) e (d). A curva (a) mostra um lento crescimento da corrente, com o aumento do potencial, enquanto a curva (c) mostra um patamar na corrente causado pela limitação no transporte de massa das espécies reagentes. No sistema descrito pela curva (d), dentro do intervalo de potencial investigado, não há transferência de carga na interface. [GABRIELLI, 1980]

Em outros casos o controle é imposto pelo próprio sistema em estudo. Como exemplo podem ser citados os fenômenos de corrosão que ocorrem na corrente resultante nula ($I = 0$), os quais obrigam um controle galvanostático.

Quando um sistema eletroquímico, após alguns fenômenos transientes, encontra-se em um estado estacionário (o sistema não varia com o tempo) e é perturbado através da aplicação de um potencial elétrico, a magnitude da corrente é limitada pela velocidade de uma ou mais etapas intermediárias da reação eletroquímica, que são chamadas de etapas cinéticas determinantes e ocorrem como passos

faradaicos simultâneos. Se muitas etapas são determinantes de um mesmo processo eletroquímico, o valor da corrente no estado estacionário não é um valor experimental relevante, já que os dados relativos às essas etapas em separado apenas poderão ser conhecidos tirando-se o sistema do estado estacionário. Neste caso os processos eletroquímicos já não ocorrem de forma espontânea e podem não ser mais característicos do sistema estudado.

Adicionalmente aos processos faradaicos simultâneos, processos não-faradaicos, tais como a capacitância da dupla camada devida ao acúmulo de cargas nas proximidades do eletrodo, são mais bem estudados com o sistema no estado estacionário.

Nos estudos dos fenômenos eletroquímicos que ocorrem na superfície de eletrodos imersos em eletrólitos, também deve ser levada em conta a resistividade do meio, que pode invalidar todos os dados relativos à interface, especialmente quando o eletrólito apresenta baixa condutividade ou em processos faradaicos extremamente rápidos.

Para estudos no estado estacionário ou próximo dele, as técnicas eletroquímicas que usam sinais alternados de pequenas amplitudes (poucos mV pico-a-pico), sobrepostos ao sinal de potencial dc de equilíbrio da interface, para perturbar o sistema, apresentam numerosas vantagens, uma vez que a resposta pode ser considerada como uma função linear da perturbação aplicada e pode ser inteiramente descrita através da expressão da impedância do sistema eletroquímico.

Nesses casos a resposta à perturbação, quando adequadamente analisada, possibilita separar a contribuição das diferentes etapas elementares do mecanismo eletroquímico global, já que as mesmas relaxam com diferentes velocidades.

Em numerosos experimentos, os processos eletroquímicos mais comuns têm sido estudados na faixa de frequências entre 10^{-3} Hz a 10^5 Hz (isto é, no domínio do tempo, um experimento pode ser realizado entre 10 μ s e 1000 s). Os valores de impedância são, então, colocados em um plano complexo em função das frequências, como o exemplificado pela Figura III.2.

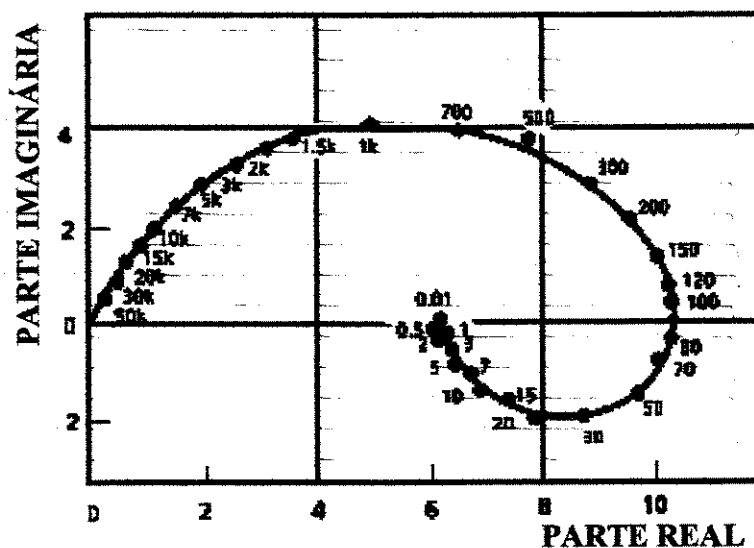


Fig. III.2: Valores de impedância em um plano complexo. [GABRIELLI, 1980]

Em geral impedâncias podem ser representadas por um circuito equivalente, que pode ser esquematizado como na Figura III.3. O limite de alta frequência mostra a resistência do eletrólito (R_e), enquanto no limite de baixa frequência encontra-se a resistência de polarização (R_p), que é igual ao inverso da inclinação da curva corrente-potencial.

Entre esses valores extremos, na faixa de altas frequências, encontra-se um arco capacitivo que geralmente é devido à capacitância da dupla camada (C) em paralelo com a resistência de transferência de carga. A faixa de baixas frequências relaciona-se com a impedância faradaica, devido à relaxação dos processos faradaicos. [GABRIELLI, 1980]

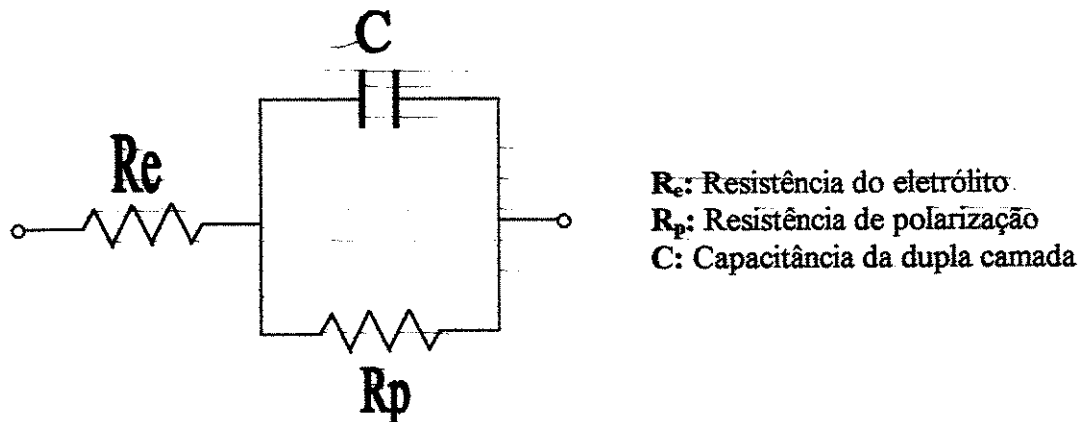


Fig. III.3: Exemplo de um circuito eletrônico equivalente de uma semicélula eletroquímica. [GABRIELLI, 1980]

É fato que a maior parte dos processos eletroquímicos de interesse são dependentes do tempo (como por exemplo, os processos de carga e descarga de baterias), o que pode restringir as medidas de

impedância que devem ser realizadas no estado estacionário. Por esse motivo são utilizados recursos que permitem reduzir sensivelmente o tempo da medida, de forma a atuar sobre o sistema como em um estado de quase-equilíbrio.

Dessa forma o emprego de recursos tais como transformadas de Laplace e Fourier, permite às técnicas de impedância (perturbações ac de pequenas amplitudes) fornecerem muitos parâmetros úteis para o estudo de fenômenos eletroquímicos. Porém, como a escolha desses parâmetros não resulta de um conhecimento completo dos processos envolvidos, parte-se sempre de um modelo idealizado, isto é, a validade desses parâmetros deve ser comprovada à partir de comparações com aplicações práticas. [GONZALES, 1985]

2. Análise dos Dados

Uma vez obtidos os dados experimentais, o objetivo é extrair os parâmetros de interesse.

Dependendo se um modelo para o sistema eletroquímico em estudo é conhecido ou não, dois tipos de gráficos podem ser considerados. Se o modelo não é conhecido, é necessário mostrar os dados sem qualquer postulado pré-interpretativo, como os gráficos de Nyquist ou de Bode, que normalmente são utilizados na análise qualitativa dos dados. Por outro lado, se um modelo é conhecido ou ao menos suposto, vários gráficos mais ou menos baseados em mecanismos de transferência de carga e difusão, são propostos na literatura. [GABRIELLI, 1980]

2.1. Gráficos qualitativos: Nyquist e Bode

- **Gráfico de Nyquist:** É o gráfico construído a partir do negativo da parte imaginária contra a parte real dos valores da impedância (ou admitância). A convenção de sinais reporta-se ao início dos estudos de impedância, quando as medidas eram feitas somente no intervalo de altas frequências e, por consequência, as interfaces pareciam exibir apenas um comportamento capacitivo. Desta forma foi adotada esta convenção para se ter um diagrama convenientemente traçado no primeiro quadrante do plano complexo.
- **Gráfico de Bode:** Na representação de Bode são apresentados dois gráficos: Em um são colocados os módulos das impedâncias e no outro as fases destas. Essas variáveis são confrontadas com os logaritmos das frequências.

A Figura III.4 mostra as diferentes configurações que os gráficos de Nyquist e Bode podem assumir, dependendo do comportamento do sistema eletroquímico. [GABRIELLI, 1980]

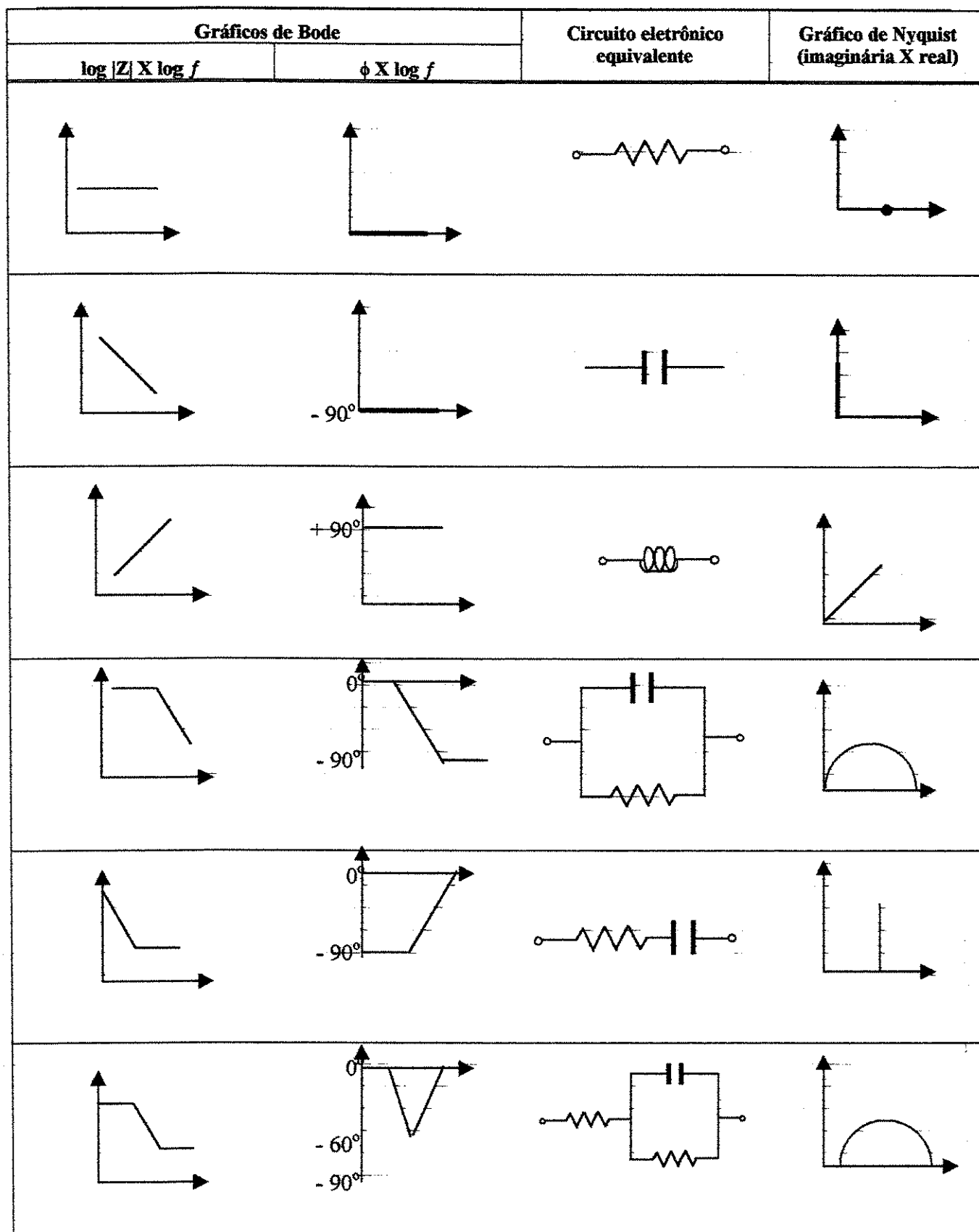


Fig. III. 4: Exemplos de gráficos de Nyquist e Bode.

2.2. Gráficos quantitativos

Quando é considerada uma reação quase-reversível, limitada pelo processo de difusão, freqüentemente é usado o circuito equivalente de Randles, como ilustrado na Figura III.5 [GABRIELLI, 1980].

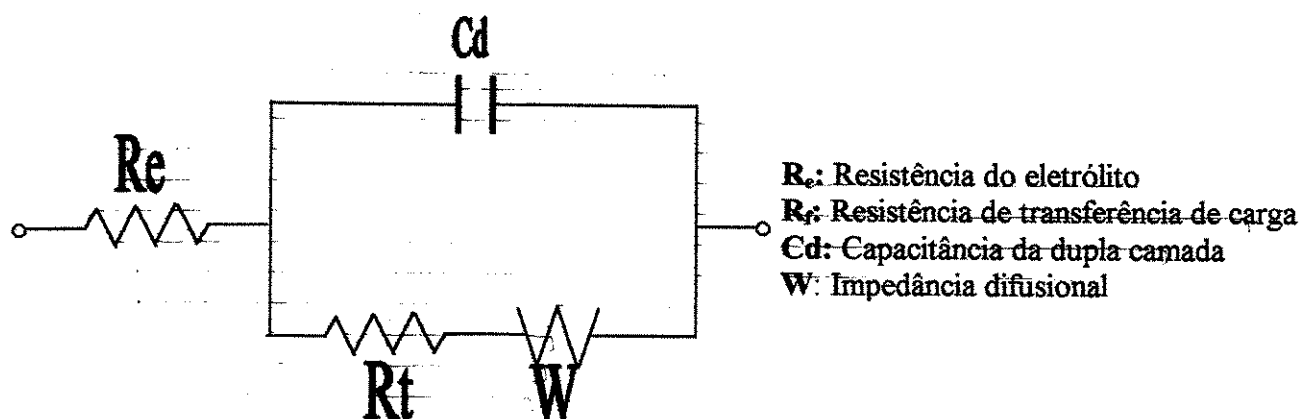


Fig. III. 5: Circuito eletrônico equivalente de Randles. [GRABRIELLI, 1980]

A impedância da parte faradaica de um circuito, como o apresentado na Figura III.5, pode ser calculada a partir da Equação III.1 [GABRIELLI, 1980]:

$$Z_F(\omega) = R_t \left(1 + \frac{\sigma}{\sqrt{j\omega}} \right) \quad \text{Equação III.1}$$

Quando:

$$\sigma = \frac{K_f}{\sqrt{D_o}} + \frac{K_b}{\sqrt{D_R}} \quad \text{Equação III.2}$$

Onde:

R_t : Resistência de transferência de carga;

K_f e K_b : velocidades das reações de equilíbrio do processo de oxi-redução;

D_o e D_R : Coeficientes das espécies oxidadas e reduzidas.

Para se obter a impedância total do circuito apresentado na Figura III.5, é necessário levar em conta a capacitância da dupla camada, C_d , e a resistividade do eletrólito R_e . Neste caso as partes real e imaginária estão na faixa intermediária de freqüências, de acordo com as equações III.3 e III.4:

$$R_e(Z) = R_e + R_t \left(1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\omega}} \right) - R_t^2 \sigma^2 C_d \quad \text{Equação III.3}$$

$$I_m(Z) = \frac{R_t \sigma}{\sqrt{2\omega}} \quad \text{Equação III.4}$$

Então, o gráfico de $R_e(Z)$ contra $\omega^{-1/2}$ (gráfico de Randles), resulta em uma linha reta onde é possível obter, simultaneamente, $R_t \sigma$, que é a inclinação da reta, e $R_e + R_t - R_t^2 \sigma^2 C_d$, que é a ordenada da interseção da reta com o eixo y, como ilustrado na Figura III.6.a.

A subtração vetorial de C_d da impedância da interface, onde R_e foi eliminado, resulta na impedância faradaica do sistema. Z_f pode ser colocado em um gráfico $R_e[Z_f]$ contra $-\omega I_m[Z_f]$. Em baixas frequências os dados resultam em uma linha reta e a extrapolação para frequência zero resulta na resistência de transferência de carga $R_t = R_e [Z_f(\omega = 0)]$. Neste diagrama a inclinação pode ser usada para a determinação do coeficiente difusional das espécies reacionais (Figura III.6.b).

Para altas frequências (R_e em série com $C_d || R_t$), um gráfico de $R_e(Z)$ contra $-I_m(Z)/\omega$ resulta em uma reta, em cuja intercessão com o eixo y encontra-se R_e , quando $\omega \rightarrow \infty$. A inclinação é igual à $1/R_t C$ e o ponto final resulta em R_t e $R_t^2 C_d$, destes dados é possível obter o valor da capacitância da dupla camada (Figura III.6.c).

A impedância de um eletrodo constituído de espécies eletroativas fortemente adsorvidas, normalmente é equivalente à capacitância da dupla camada C_d , em paralelo com uma capacitância em série com um resistor. Neste caso o gráfico de Y/ω , onde $Y = Z^{-1}$, resulta em um círculo centrado no eixo da parte imaginária. A intercessão desse círculo com o eixo y resulta nas duas capacitâncias envolvidas (Figura III.6.d).

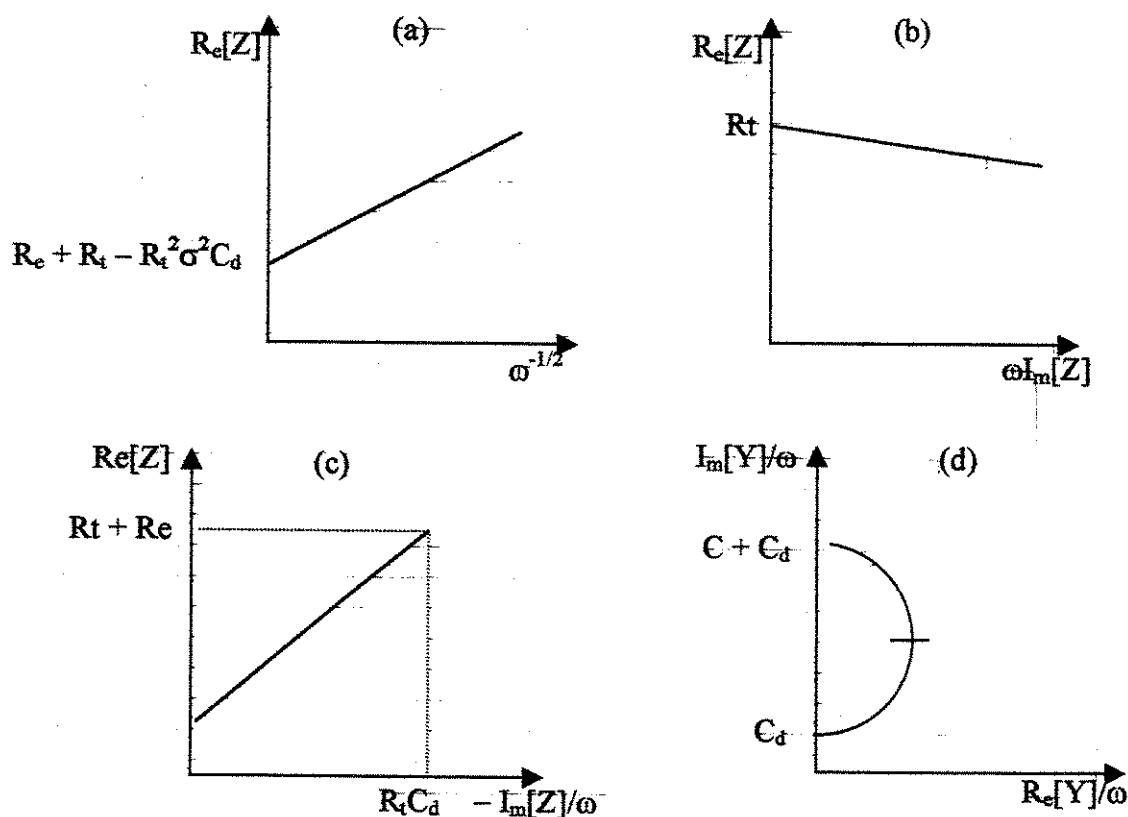


Fig. III.6: Exemplos de gráficos quantitativos. [GABRIELLI, 1980]

3. Referências Bibliográficas do Capítulo III

[GABRIELLI, 1980] Gabrielli, C.; Identification of electrochemical processes by frequency response analysis; Schlumberger Instruments; Farnborough; U.K., pp 1.4 – 1.11, 2.34 – 2.37 (1980).

[GONZALES, 1985] Gonzales, J. A.; Molina, A.; Escudero, M. L.; Andrade C.; Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete; Corr. Sci., **25** (1985) p. 917-930.

Capítulo IV

A técnica de impedância eletroquímica aplicada ao estudo de baterias

1. Introdução

A pergunta a ser respondida agora é a seguinte: é possível determinar o estado de degradação de uma bateria e prever seu desempenho futuro, com alto grau de confiabilidade, através das técnicas de impedância eletroquímica?

Com base nos conceitos teóricos expostos nos capítulos anteriores, a resposta antecipada é: sim. Porém, algumas vezes, é difícil provar um conceito. Neste caso a prova é encontrada na prática, analisando-se dados de impedância obtidos de centenas de baterias, coletados nos últimos oito ou dez anos, a partir de pesquisas realizadas em praticamente todos os continentes. [VACCARO,1987; FEDER; LAIDG, 1991]

No ano de 1988 uma das primeiras publicações técnicas sobre o assunto [DEBARDELABEN, 1988] concluiu, baseada em dados de impedância extraídos de baterias chumbo-antimônio de 7000 Ah, que “as medidas de impedância podem ser utilizadas como substitutas para os testes de capacidade”. Embora esse trabalho tenha demonstrado uma correlação entre os valores de impedância e diferentes níveis de carga para um tipo particular de bateria, foi o primeiro a utilizar técnicas de medida que poderiam ser empregadas com a bateria em serviço.

Anteriormente a esse trabalho, um grupo de pesquisadores da AT&T, estudando baterias chumbo-ácidas reguladas por válvulas (VRLA) de 38 Ah, concluíram “existir uma relação linear entre níveis de carga e valores de impedância”. [VACCARO,1987]

De fato o valor absoluto da impedância é uma função da integridade dos condutores (pólos, grades, conexões internas, placas, etc.), bem como da porção eletroquímica (eletrólito) do sistema.

Por exemplo, as placas de uma bateria sofrem deterioração e mudam de dimensão durante o tempo de vida útil do acumulador. Durante esse período também ocorrem processos corrosivos e perda de contato entre os condutores internos da bateria e seus respectivos pólos, levando ao aumento dos valores da impedância do sistema.

Esses fatores que influenciam o comportamento dos dados de impedância são válidos tanto para baterias ventiladas como para baterias VRLA. Porém, para estas últimas, mudanças mais significativas são devidas à perda de água, uma vez que não é possível corrigir seu nível de eletrólito.

Segundo dados obtidos na prática, baterias de diferentes tamanhos e processos de fabricação diferenciados, exibem valores de impedância diferentes, porém as baterias com tamanhos, idade e histórico de ciclagem similares, exibem leituras similares de impedância. [MARKLE, 1993]

Também com base em dados experimentais *Laidig* demonstrou que acumuladores, cuja impedância atinge valores 30% maiores do que seus valores iniciais, apresentam baixa capacidade de carga e risco de colapso. [LAIDIG, 1995]

Com base nos fatos citados anteriormente é possível afirmar que as medidas de impedância, quando realizadas periodicamente, podem ser usadas para acompanhar o processo de degradação de um acumulador. E, obtendo-se dados suficientes para um levantamento histórico, pode ser feita uma projeção do desempenho futuro da bateria.

2. Variáveis que influenciam nos valores de impedância das baterias

2.1. Efeitos do nível de carga sobre os valores de impedância da bateria

Como nas baterias chumbo-ácidas o nível de carga influencia principalmente na composição do material ativo das placas e na densidade do eletrólito, torna-se evidente que esse parâmetro é um fator determinante dos valores de impedância de uma bateria, como mostram os gráficos da Figura IV.1, obtidos para cada um dos 24 elementos de uma bateria, quando esta se encontrava no estado de plena carga e após descarga total. [MARKLE, 1993]

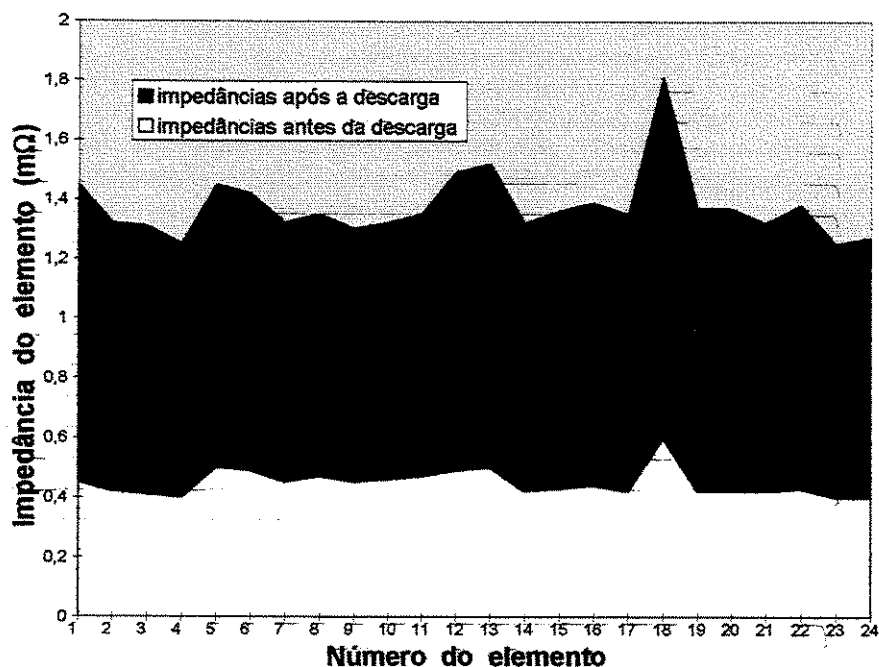


Fig. IV.1: Variação da impedância interna com o estado-de-carga da bateria. [MARKLE, 1993]

Como os gráficos da Figura IV.1 indicam, os valores à plena carga permitem estimar os valores no final da descarga. Esta propriedade dos valores de impedância, associados ao conhecimento do comportamento de autodescarga de uma bateria, pode ser útil na previsão de estados parciais de carga, como por exemplo, após determinado período de estoque.

2.2. Efeitos da temperatura sobre os valores de impedância da bateria

Já é bem documentado que a operação de baterias chumbo-ácidas em ambientes com temperaturas acima de 25°C, leva à degradação das placas por processos corrosivos. Portanto, quanto mais alta for a temperatura de operação, menor será a vida útil do acumulador. Por outro lado, em temperaturas abaixo de 25°C, a facilidade com que a bateria é carregada ou descarregada pode diminuir.

A figura IV.2 mostra a variação dos valores de impedância interna de duas baterias VRLA com eletrólito gelificado, quando ensaiadas no intervalo de temperaturas entre -33 a 56°C. [MARKLE, 1993]

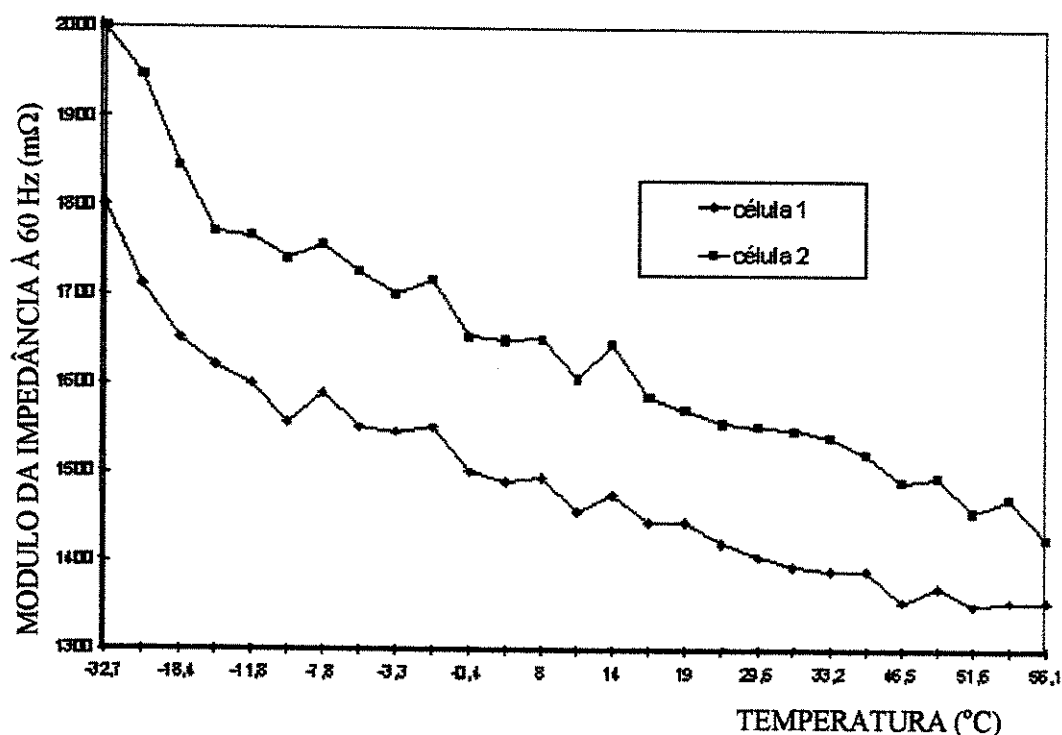


Fig. IV.2: Relação entre valores de impedância de baterias VRLA contra temperatura ambiente. [MARKLE, 1993]

As curvas da Figura IV.2 mostram consistência ao se comparar os dados obtidos para cada bateria, uma vez que mostram linearidade na região central, crescimento assintótico nas baixas temperaturas e abaixamento nas temperaturas mais altas. O gráfico da Figura IV.2 também mostra uma variação nos valores de impedância de 35%, dentro do intervalo de temperaturas ensaiado (-33 a 56°C).

A Figura IV.3 mostra a relação entre os dados de impedância com a temperatura ambiente, para duas baterias VRLA, com eletrólito absorvido em lã de vidro. [MARKLE, 1993]

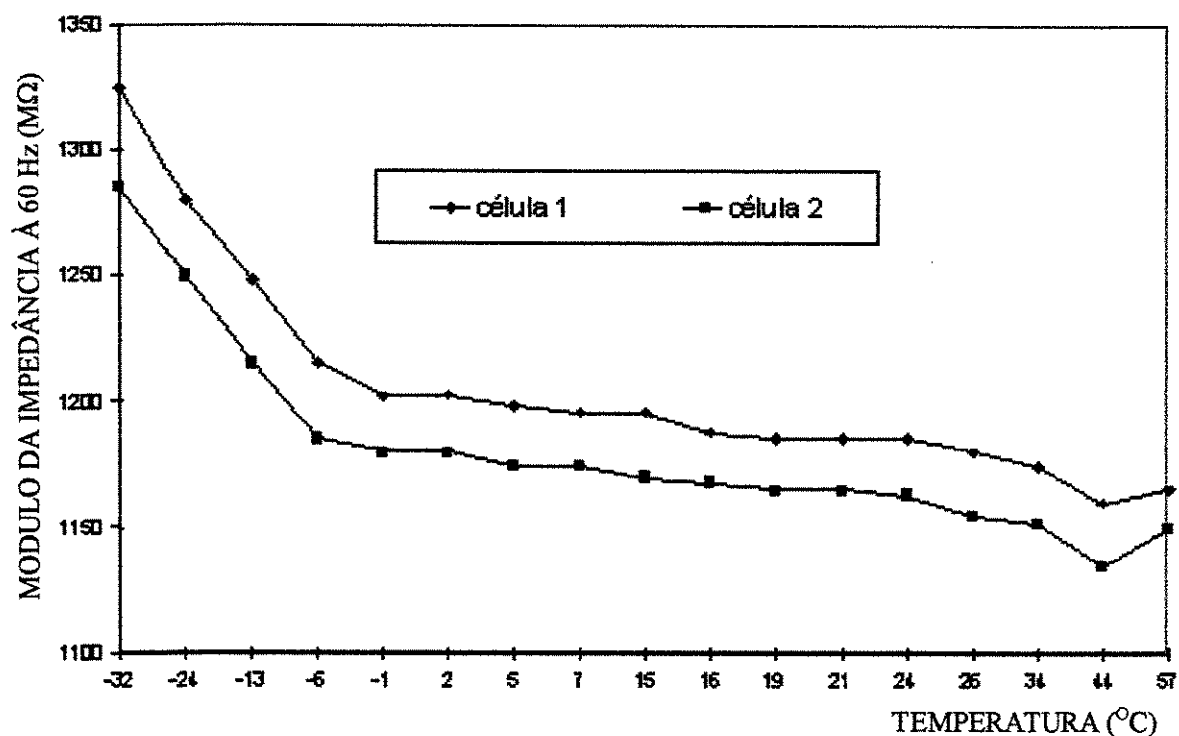


Fig. IV. 3: Variação com a temperatura ambiente dos valores de impedância de baterias VRLA. [MARKLE, 1993]

As curvas da Figura IV.3 mostram uma resposta assintótica no intervalo de baixas temperaturas (-33 a -3°C) e boa consistência dos dados, quando comparados os valores obtidos para cada bateria.

Na Figura IV.4 encontram-se dados referentes à variação dos valores de impedância com a temperatura, de duas baterias VRLA também com eletrólito absorvido em lã de vidro, porém de menor capacidade e fabricação diferente das apresentadas na Figura IV.3.

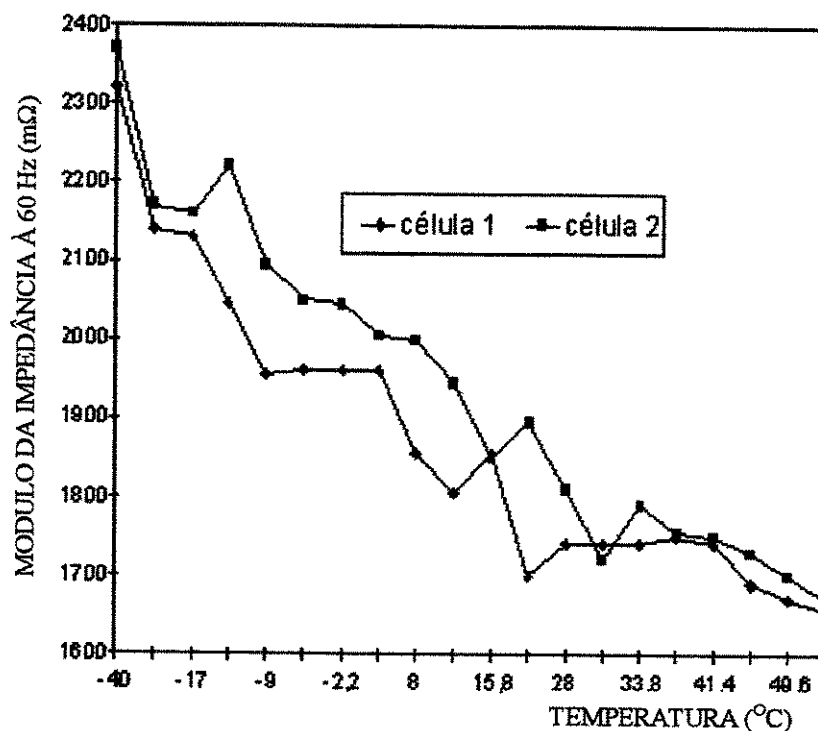


Fig. IV. 4: Variação dos valores de impedância de baterias VRLA com a temperatura ambiente. [MARKLE, 1993]

Os resultados são similares aos apresentados na figura IV.3, porém a consistência dos dados, quando comparados entre cada bateria, não é tão evidente. [MARKLE, 1993]

3. Métodos para a determinação dos valores de impedância de baterias

Muitos autores têm considerado a possibilidade de estimar a carga residual de baterias chumbo-ácidas, incluindo as VRLAs, a partir de suas características de impedância.

Para esse propósito os valores da resistência ôhmica do eletrólito e da massa ativa da placa têm sido propostos como parâmetros [MARKLE, 1993]. Outros autores recomendam a análise das características de impedância na região do controle cinético, chamado de resistência da transferência de carga, a capacitância da dupla camada ou a frequência correspondente ao máximo do semicírculo do diagrama de Nyquist nas altas frequências [HUGHES, 1985; HUGHES, 1986]. Há autores ainda que consideram a região de baixas frequências (abaixo de 1 Hz) como a mais representativa. [KEDDAM, 1977]

Dessa forma, embora os especialistas difiram na metodologia de aplicação da técnica, são unânimes em afirmar que os dados permitem conhecer o estado de degradação da bateria, bem como prever seu desempenho futuro, e que, quando comparados com outras alternativas, tais como o teste

de capacidade, fornecem um método de avaliação relativamente passivo, de baixo custo e que pode ser realizado automaticamente, fornecendo dados com as baterias em operação.

Observa-se também que os dados de impedância, quando obtidos isoladamente, pouco podem informar sobre a bateria, sendo necessário que esses dados sejam coletados periodicamente constituindo um histórico do acumulador. Em outras palavras, valores relativos são mais significativos que os números absolutos.

3.1. Métodos práticos para determinação da impedância de baterias

Em termos gerais os métodos empregados na determinação da impedância de uma bateria podem ser divididos em duas categorias: mono-frequência e multi-frequências.

Os métodos da primeira categoria utilizam apenas um valor de frequência para a medida da impedância. Esse valor varia de método para método, estando normalmente dentro do intervalo de 16 Hz a 1 kHz. [NOMOROLSKI, 1994] Esses métodos, embora úteis para a elaboração do histórico do acumulador, não fornecem informações sobre os componentes internos da bateria, separadamente.

Na segunda categoria enquadram-se os métodos que utilizam como sinal de entrada uma onda complexa, contendo uma faixa de frequências, que possibilita acessar informações sobre diversos componentes da bateria. Neste caso são usados métodos para tratamentos dos dados baseados em transformada de Fourier (FT), para converter o sinal de resposta do domínio do tempo para o domínio das frequências.

Porém na análise de um banco de baterias de grande capacidade, sem desconectá-lo do equipamento consumidor, surgem algumas dificuldades para ensaios de qualquer uma das categorias mencionadas.

A principal fonte dessas dificuldades são as mudanças dependentes do tempo, que ocorrem no circuito elétrico ao qual o banco de baterias está conectado.

Como exemplo dessas mudanças pode ser citado o alto nível de ruído de uma central telefônica, causado pelo número elevado de chamadas. Este ruído superpõe-se ao sinal de teste, complicando as medidas de impedância.

Os equipamentos comerciais procuram minimizar essas interferências através de filtros ou dispositivos que permitam separar os ruídos de fundo do sinal de teste.

Uma outra alternativa é considerar esses ruídos de fundo como um sinal de teste, desde que são aproximadamente randômicos (determinados pelo número e frequência das chamadas telefônicas) e constituem-se em sinais com diferentes frequências.

Trabalhando-se com esse sinal, medindo-se a corrente que é fornecida à bateria, o potencial entre seus pólos e usando métodos FT para transformar os dados para o domínio da frequência, podem ser determinadas as características de impedância da bateria de uma maneira completamente passiva, isto é, não requerendo a aplicação de um sinal externo e não retirando o banco de operação. [ROBNSON, 1993]

A Figura IV.5 mostra dois diagramas de Nyquist obtidos de medidas de impedância realizadas em uma mesma célula, usando como entrada um sinal randômico (fig. IV.5a) e o ruído de fundo de uma central telefônica (fig. IV.5b).

Nota-se pela comparação entre as duas figuras, que, através da resposta dada ao ruído de fundo da central, é possível estimar o diagrama de Nyquist para a bateria. [ROBINSON, 1993]

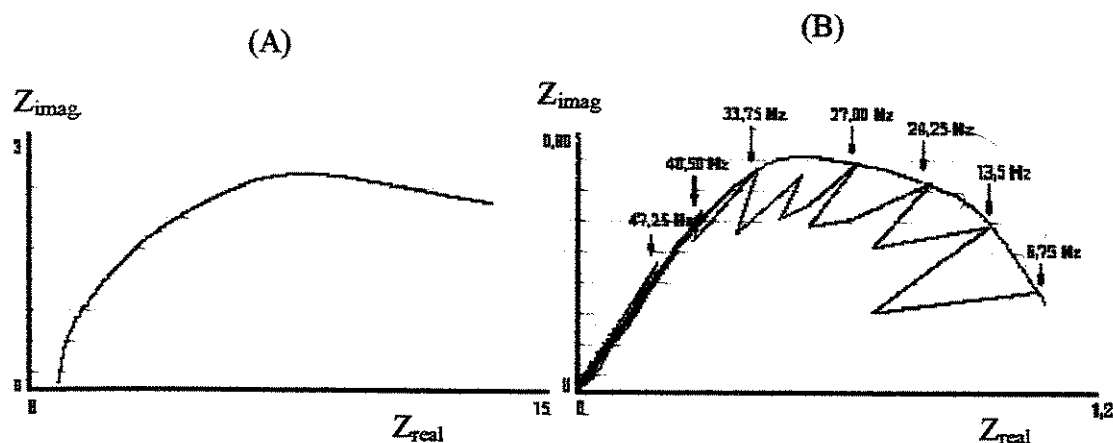


Fig. IV. 5: Diagramas de Nyquist para uma mesma célula, usando como sinais de entrada: a) sinal randômico e b) ruído de fundo de uma central telefônica. [ROBNSON, 1993]

4. Referências Bibliográficas do Capítulo IV

[VACCARO, 1987] F.J. Vaccaro, P. Casson: AT&T Bell Laboratories Technical Memorandum, Internal Resistance: Harbinger of Capacity Loss in Starved Electrolyte Sealed Lead Acid Batteries” Proceedings of the 1987 INTEC Conference, pp. 128-135.

[FEDER,] D. O. Feder, M. Hlavac, D.Ogden: “Field Application of Conductance Measurements Used to Ascertain Cell/Battery and Inter-Cell Connection state-of-Health In Electric Power Utility Applications”

- [LAIDIG, 1991] M.R. Laidig, J.W. Wurst: "Battery Failure Prediction", Proceedings of Predictive Technology Symposium, Picatinney Arsenal, Dover, N.J. Nov. 1991.
- [MARKLE, 1992] G.J. Markle: "AC Impedance Testing For Valve Regulated Cells", Proceedings of the 1992 INTELEC Conference, pp. 212-217.
- [LAIDIG, 1994] M.R. Laidig, J.W. Wurst: "Technology Implementation of Stationary Battery Failure Prediction", Proceedings of the Annual Battery Conference, Long Beach, January 12, 1994.
- [DEBARDELABEN, 1988] S.L. Debardelaben: "A Look At The Impedance of A Cell", Proceedings of the 1988 INTELEC Conference, pp. 394-397.
- [MARKLE, 1993] G.J. Markle: "Variables That Influence Results Of Impedance Testing For Valve Regulated Cells", Proceedings of the 1993 INTELEC Conference, v1, pp 444-448.
- [LAIDIG, 1995] M. R. Laidig: "Determination Of Status Of Stationary Battery Systems", Proceedings of the 10th Annual Battery Conference on Applications and Advances, 1995, pp 227-232.
- [BARTON, 1989] R.T. Barton, P.S. Mitchell, *J. Power Sources*, 27 (1989) 287-295.
- [HUGHES, 1985] M. Hughes, R.T. Barton, S.A.G.R. Karunathilaka, N.A. Hampson, *J. Appl. Electrochem.*, 15 (1985) 251.
- [HUGHES, 1986] M. Hughes, R.T. Barton, S.A.G.R. Karunathilaka, N.A. Hampson, *J. Appl. Electrochem.*, 16 (1986) 555-564.
- [KEDDAM, 1977] M. Keddam, Z. Soynov, H. Takenouti, *J. Appl. Electrochem.*, 7 (1977) 539-544.
- [NOMOROLSKI, 1994] Z. Nomorolski, J.M. Nomorolski: "Monitoring Of Multicell Battery String With Single Sensing Wire", Proceeding of the 1994 INTELEC Conference, NY, USA, pp 486-490.
- [ROBNSON, 1993] R.S. Robnson, "System Noise As A Signal Source For Impedance Measurements On Battery Strings", Proceedings of the 1993 INTELEC Conference, v2, pp 365-368.

Capítulo V

Materiais e métodos

1. Introdução

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos utilizados para a obtenção dos dados experimentais, necessários ao desenvolvimento desta dissertação.

2. Caracterização da bateria ensaiada

2.1. Características construtivas

Para o levantamento dos dados de impedância com o estado-de-carga, foi utilizada uma bateria chumbo-ácida ventilada, fabricada pela NIFE, modelo LÓRICA, com capacidade nominal de 75Ah, no regime de 10 horas. Essa bateria é formada pela associação em série de três elementos do tipo TM25, com capacidade nominal de 25 Ah, cada um, alojados em um mesmo monobloco. A Figura V.1 mostra os principais constituintes dessa bateria, através de um desenho esquemático de um monobloco com dois elementos. [NIFE,1999]

Os elementos NIFE-TM apresentam as seguintes características construtivas:

- **Placas positivas:** As placas positivas são blindadas, do tipo multi-tubular, com grade de PbSbSe;
- **Placas negativas:** As placas negativas são planas, do tipo empastadas, e as grades são de liga PbSb;
- **Separadores:** Os elementos TM possuem dupla separação entre placas, constituída por um separador microporoso (poliéster-fenol) junto à placa negativa e um distanciador plástico (perfurado e ondulado) junto à placa positiva;
- **Recipiente:** O vaso ou recipiente que contém os três elementos, formando um monobloco, é de polímero SAN transparente, com marcação para os níveis máximo e mínimo do eletrólito;
- **Tampa:** A tampa do monobloco é polimérica, do tipo alto impacto;
- **Pólos:** Os pólos são constituídos de liga PbSbSe e cada um possui um inserto interno de cobre, no qual é fixada a fiação de contato com o circuito externo através de um parafuso, rosqueado na posição vertical. Os pólos são protegidos externamente por uma capa plástica de polipropileno injetada.

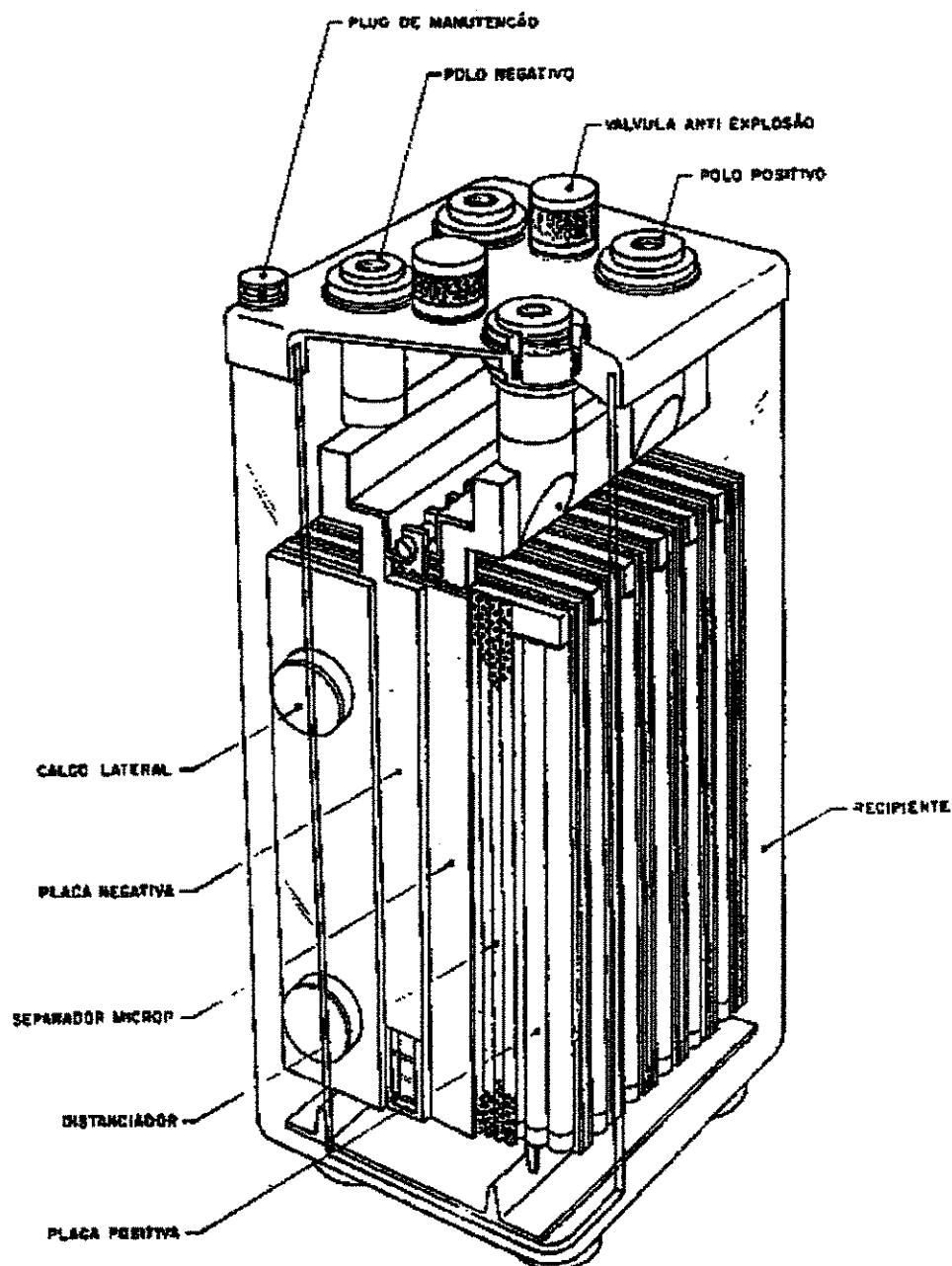


Fig. V.1: Desenho esquemático do monobloco NIFE-TM de dois elementos. [NIFE, 1999]

2.2. Características nominais de descarga

A Figura V.2 apresenta as características nominais de descarga de um elemento NIFE-TM, através de um gráfico da tensão pelo tempo de descarga, no regime de 0,1 de C10 (consumo de 10% da carga nominal por hora). [NIFE, 1999]

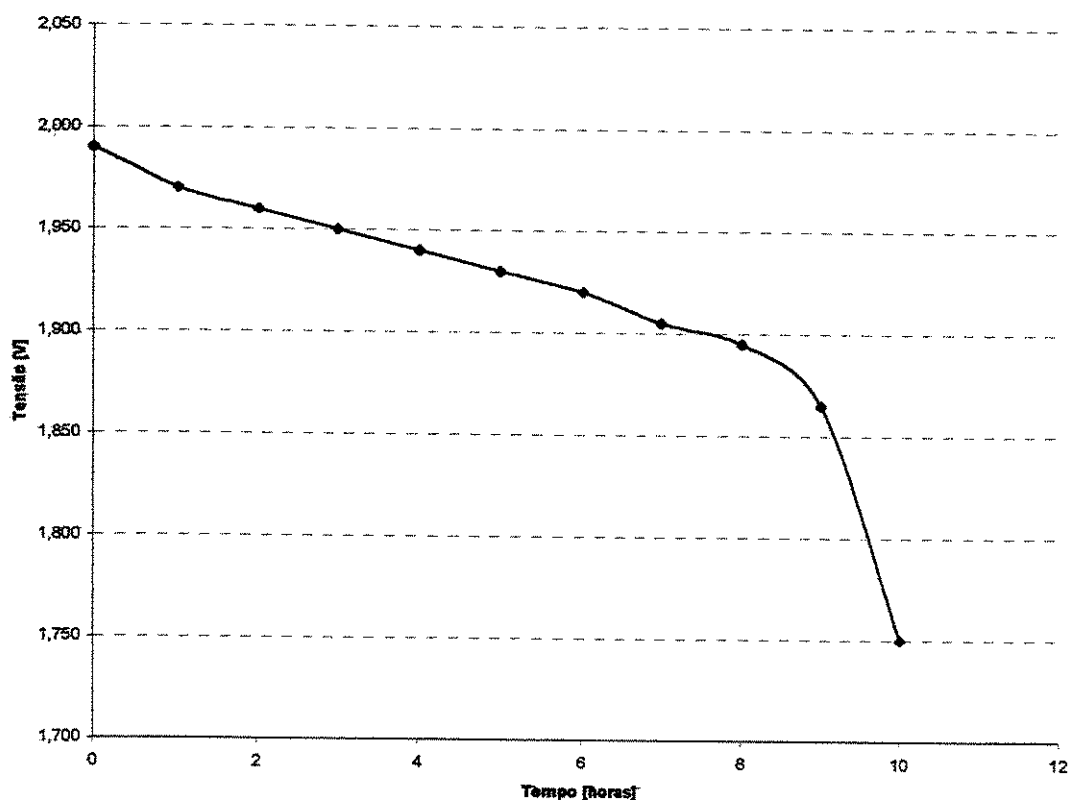


Fig. V.2: Curva nominal de descarga para o elemento NIFE-TM, regime C10. [NIFE, 1999]

2.3. Capacidade real da bateria

Antes do início dos ensaios de impedância foi determinada a capacidade real de carga da bateria utilizada para o levantamento dos dados. O procedimento adotado e descrito a seguir, foi especificado pelo fabricante [NIFE, 1999]:

- Adicionou-se água destilada ao eletrólito até que seu nível atingiu a marca de nível máximo, existente no vaso da bateria;
- Forneceu-se carga à bateria através de corrente constante, no regime de 0,1 de C10, até o instante final de carga;
- A partir do instante final de carga procedeu-se a carga de equalização, com corrente limitada ao máximo de 5% da capacidade nominal da bateria, por um período de 72 horas;
- Após a equalização a bateria permaneceu em circuito aberto por um período de 24 horas;
- A bateria foi descarregada através de uma carga dinâmica que consumia uma corrente constante de 15A/h (regime 0,2 de C10), até o instante final de descarga;

f) Durante a operação de descarga foram realizadas medidas periódicas do potencial elétrico e da densidade do eletrólito em cada um dos três elementos. Essas medidas foram realizadas com as seguintes periodicidades:

- Até o potencial de 1,90 V as medidas foram realizadas a cada hora;
- No intervalo de potenciais entre 1,90 V e 1,85 V as medidas foram realizadas a cada 30 minutos;
- Após o valor de 1,85 V as medidas foram realizadas a cada 15 minutos, até que um dos elementos atingiu o potencial de 1,75 V, quando a bateria foi considerada descarregada e o procedimento de descarga interrompido.

A Figura V.3 apresenta o esquema elétrico utilizado para os procedimentos de carga da bateria, enquanto o esquema utilizado para a descarga é apresentado na Figura V.4.

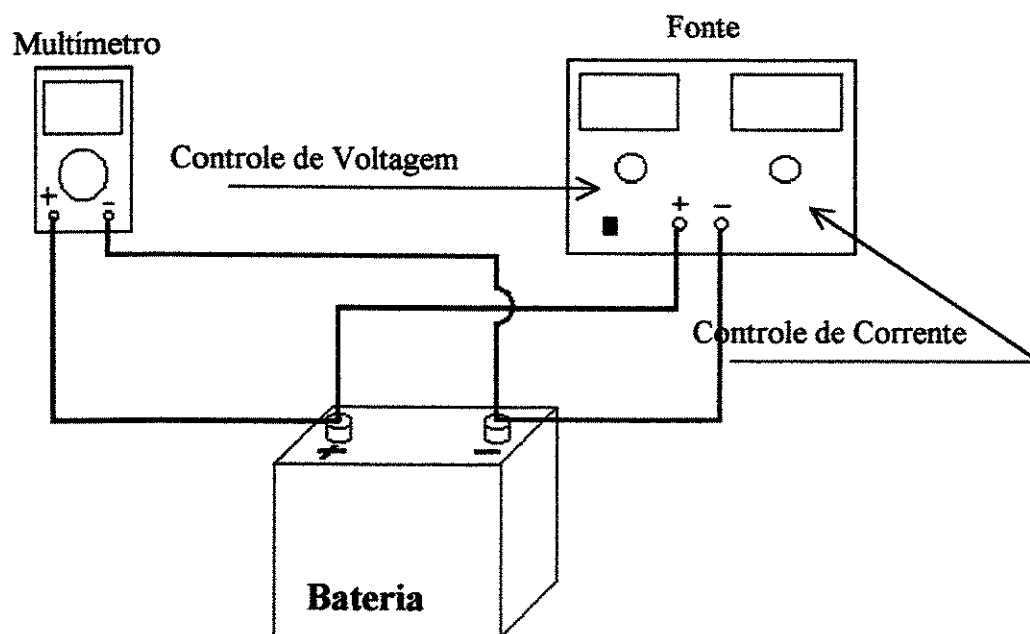


Fig. V. 3: Sistema elétrico para procedimento de carga.

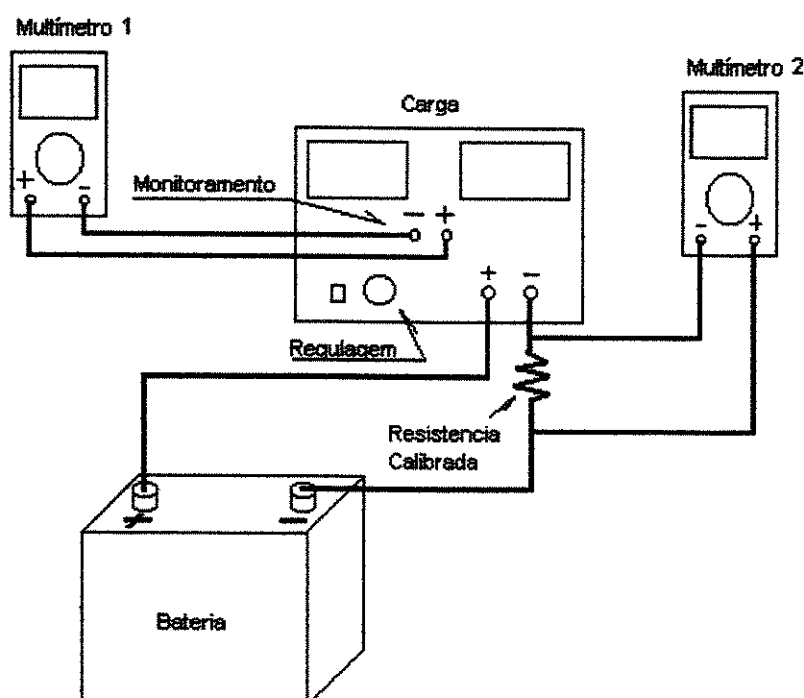


Fig. V. 4: sistema elétrico para procedimento de descarga.

2.4. Variação da densidade do eletrólito em função do estado-de-carga

Durante a operação de descarga também foi acompanhada a variação da densidade do eletrólito de cada elemento. As medidas de densidade foram realizadas com a mesma periodicidade empregada para as medidas de potencial, descrita no item 2.3.f deste Capítulo.

2.5. Espectroscopia de impedância eletroquímica

Para o levantamento dos dados de impedância da bateria foi utilizado um potenciostato marca EG&G, modelo 273A, um analisador de frequências (FRA) da Solartron, uma fonte de corrente e um amperímetro marca HP.

Foram coletados 5 pontos por década, no intervalo de frequências de 10^{-4} a 10^6 Hz.

O sinal de teste foi aplicado no potencial apresentado pela bateria após um período mínimo de 8 horas em circuito aberto, observado após cada operação de descarga.

Visando evitar a descarga da bateria através do potenciostato, durante os ensaios de impedância foi utilizada uma fonte de corrente ligada no sentido inverso ao de descarga. Antes das mediadas de impedância, a partir desta fonte, injetava-se corrente na bateria até se obter leitura zero no amperímetro em série no circuito fonte/bateria, conforme esquematizado no diagrama da Figura V.5.

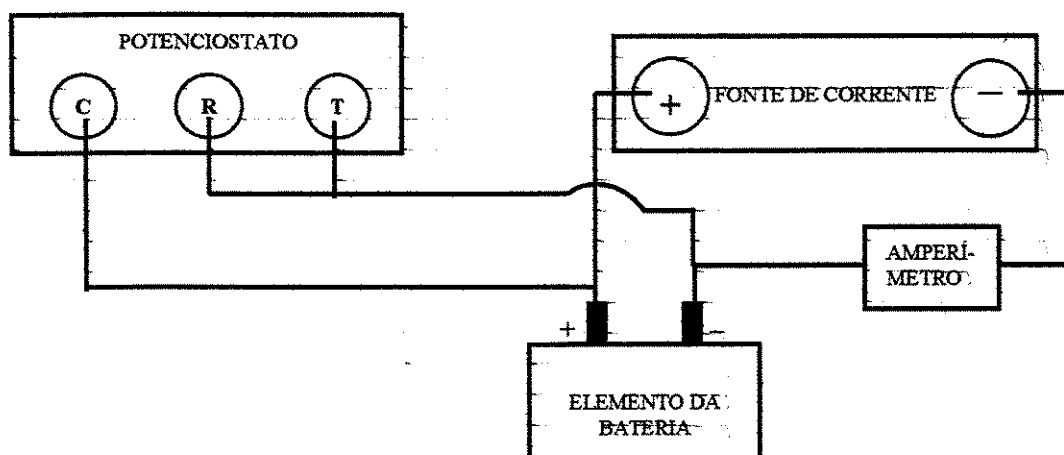


Fig. V. 5: Esquema elétrico para determinação dos dados de impedância.

Na determinação da impedância dos elementos da bateria em cada estado de carga, foi utilizada a seguinte metodologia:

- A bateria foi carregada até seu instante final de carga seguindo-se de carga de equalização, conforme procedimento descrito nos itens de 2.3.a. à 2.3.d, deste Capítulo;
- Após o período de equalização foram obtidos os seguintes dados de cada elemento da bateria, referentes ao estado de plena carga (assumindo este estado como sendo 100% da capacidade da bateria): impedância, potencial em circuito aberto e densidade do eletrólito;
- Utilizado-se o sistema elétrico esquematizado na Figura V.4 a bateria foi descarregada no regime $0,2 \times C_{10}$ (15A/h) até seu instante final de descarga, dividindo-se o procedimento em etapas de descarga. A quantidade de carga retirada em cada etapa de descarga foi calculada a partir do tempo de duração de cada etapa, conforme apresentado na Tabela V.1;
- Após cada etapa de descarga observou-se um período mínimo de 8 horas com a bateria em circuito aberto, antes do levantamento dos dados de impedância, potencial e densidade do eletrólito, de cada elemento;

Tabela V. 1 : Etapas de descarga

Tempo de descarga (min)	0	30	60	90	120	150	180	200	220	240	260	280	300	final
Estado-de-carga(%)	100	90,63	81,25	71,88	62,50	53,13	43,75	37,50	31,25	25,00	18,75	12,50	6,25	0

3. Referência bibliográfica do Capítulo V

[NIFE,1999] “Manual de operação e manutenção de baterias ácidas LÓRICA”, documento código 70.98095; SAB NIFE.

Capítulo VI

Dados obtidos

1. Introdução

Este capítulo apresenta os dados obtidos nos ensaios descritos no Capítulo V e que são relevantes para a discussão e conclusões apresentadas nesta dissertação. Os dados complementares podem ser encontrados no Anexo 2.

2. Capacidade real de carga da bateria

De acordo com o procedimento apresentado no item 2.3 do Capítulo V, os dados obtidos para a capacidade real da bateria estudada são apresentados no gráfico da Figura VI.1. Este gráfico mostra a curva de tensão pelo tempo obtida durante a operação de descarga. Nota-se que o elemento número dois foi o primeiro a atingir o potencial limite de 1,75 V, determinando o instante final de descarga da bateria.

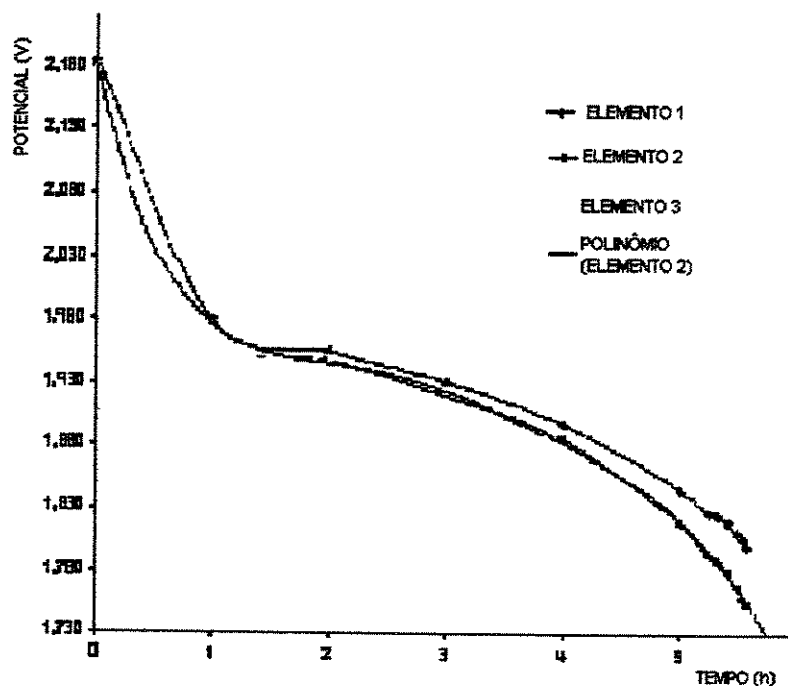


Fig. VI.1: Curva de descarga em 0,2 de C10.

O instante final de descarga da bateria deu-se 5h e 25 min após o início do procedimento de descarga. Considerando-se que a descarga foi realizada à razão de 15A/h, a capacidade total (S_t) apresentada pela bateria pode ser calculada como indicado a seguir:

$$S_t = 15 \text{ A/h} \times 5,42 \text{ h} = 81,3 \text{ A}$$

Dessa forma a bateria apresentou a capacidade de fornecer 81,3 A, no regime de descarga de 15A/h. Este valor de capacidade representa 108,4% da capacidade nominal da bateria estudada. Esse excesso de capacidade é normal para baterias novas, projetadas para uma vida útil de 20 anos. [SOUZA, 1999]

Para as finalidades dos estudos apresentados nesta dissertação, a capacidade de carga de 81,3 A foi assumida como sendo 100% da capacidade da bateria.

3. Variação da densidade do eletrólito em função do estado-de-carga

Os valores médios de densidade de eletrólito, calculados a partir dos valores obtidos para cada elemento, após cada etapa do processo de descarga (ver item 2.3 do Capítulo V), em função do estado-de-carga da bateria, são apresentados no gráfico da Figura VI.2.

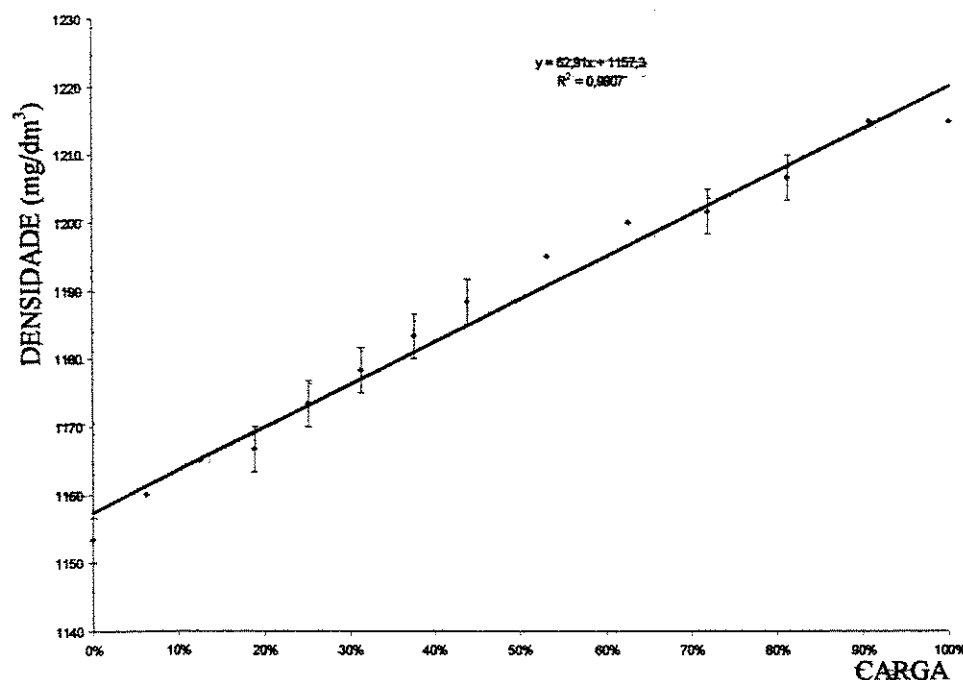


Fig. VI.2: Densidade do eletrólito em função do estado-de-carga.

Os dados da Figura VI.2 apresentam boa linearidade ($R^2 = 0,9807$), com o eletrólito assumindo o maior valor de densidade quando a bateria está em plena carga e densidade mínima no instante final de descarga. Esse comportamento é coerente com a teoria da dupla sulfatação, como exposto no item 2 do Capítulo II.

4. Espectroscopia de impedância eletroquímica

4.1. Dados experimentais

Conforme descrito no item 2.5 do capítulo V, após cada etapa de descarga foram determinados os parâmetros de impedância de cada elemento da bateria. Desse procedimento resultaram os valores dos módulos da impedância e dos ângulos de mudança da fase do sinal aplicado, no intervalo de 10^{-4} a 10^6 Hz, para cada elemento da bateria.

a) Valores dos módulos da impedância e ângulos de mudança da fase:

Como exemplo dos dados obtidos, a Tabela VI.1 apresenta os módulos da impedância e os ângulos de mudança da fase, no estado-de-carga de 100%. Demais dados encontram-se nas Tabelas de 1 a 14 do Anexo II.

Tabela VI.1: Módulos da impedância e ângulos de mudança da fase no estado-de-carga $S = 100\%$

f (Hz)	Z (Ω)			ϕ (grau)		
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3
1,000E-01	5,378E-02	4,198E-02	5,676E-02	3,4	3,9	2,8
1,585E-01	5,333E-02	4,138E-02	5,614E-02	2,3	2,7	2
2,512E-01	5,284E-02	4,140E-02	5,627E-02	1,9	2	1,6
3,981E-01	5,268E-02	4,106E-02	5,592E-02	1,4	1,7	1,1
6,310E-01	5,246E-02	4,080E-02	5,587E-02	1	1,3	0,9
1,000	5,227E-02	4,075E-02	5,611E-02	0,8	1	0,7
1,585	5,216E-02	4,066E-02	5,613E-02	0,6	0,9	0,5
2,512	5,203E-02	4,048E-02	5,604E-02	0,5	0,5	0,4
3,981	5,191E-02	4,034E-02	5,581E-02	0,4	0,3	0,4
6,310	5,179E-02	4,025E-02	5,584E-02	0,4	0,3	0,4
1,000E+01	5,167E-02	4,018E-02	5,550E-02	0,4	0,3	0,3
1,585E+01	5,159E-02	4,011E-02	5,538E-02	0,3	0,3	0,3
2,512E+01	5,137E-02	4,014E-02	5,497E-02	0,2	0,4	0,2
3,981E+01	5,124E-02	4,003E-02	5,509E-02	0,1	0,4	0,1
6,310E+01	5,112E-02	3,994E-02	5,503E-02	-0,1	0,1	-0,1
1,000E+02	5,104E-02	3,995E-02	5,493E-02	-0,4	-0,2	-0,3
1,585E+02	5,098E-02	3,997E-02	5,486E-02	-1	-0,6	-0,8
2,512E+02	5,093E-02	3,996E-02	5,503E-02	-1,8	-1,9	-1,5
3,981E+02	5,102E-02	4,001E-02	5,496E-02	-3	-3,1	-2,6
6,310E+02	5,118E-02	4,015E-02	5,540E-02	-4,9	-5,1	-4,2
1,000E+03	5,176E-02	4,031E-02	5,578E-02	-7,7	-8,7	-6,6
1,585E+03	5,257E-02	4,112E-02	5,651E-02	-11,9	-13,7	-10,4
2,512E+03	5,436E-02	4,305E-02	5,826E-02	-18,2	-21,4	-15,9
3,981E+03	5,803E-02	4,650E-02	6,111E-02	-27,3	-31,1	-24,3
6,310E+03	6,597E-02	5,499E-02	6,814E-02	-39,3	-44,1	-36,6
1,000E+04	8,269E-02	7,091E-02	8,291E-02	-53,3	-57,7	-49,5
1,585E+04	1,158E-01	1,034E-01	1,131E-01	-66,8	-70,1	-64
2,512E+04	1,779E-01	1,622E-01	1,718E-01	-77,3	-79,7	-75,3
3,981E+04	2,853E-01	2,676E-01	2,746E-01	-83,6	-86,3	-82,4
6,310E+04	4,588E-01	4,292E-01	4,418E-01	-87,2	-99,1	-86,4
1,000E+05	7,323E-01	6,838E-01	7,050E-01	-89,6	-90,7	-89,1
1,585E+05	1,158	1,820	1,115	-92	-92,8	-91,7
2,512E+05	1,839	1,709	1,769	-94,7	-95,5	-94,5
3,981E+05	2,560	2,474	2,446	-98,6	-101	-98,7
6,310E+05	1,604E+01	1,329E+01	1,506E+01	-116	-126	-111
1,000E+06	5,271E-02	4,006E-02	6,161E-02	-0,3	0	-0,2

b) Valores médios dos módulos da impedância, ângulos de mudança da fase e desvios padrão:

Os valores médios dos módulos da impedância e dos ângulos de mudança de fase, foram calculados a partir dos valores obtidos para cada elemento do acumulador (Eq. VI.1 e Eq. VI.2). Os valores dos desvios padrão foram calculados a partir desses valores médios, conforme as Equações VI.3. e VI.4.

$$|Z| = \frac{|Z|_1 + |Z|_2 + |Z|_3}{3} \quad \text{Eq. VI.1}$$

$$\phi = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \phi_3}{3} \quad \text{Eq. VI.2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum |Z|^2 - (\sum |Z|_y)^2}{n(n-1)}} \quad \text{Eq. VI.3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum \phi^2 - (\sum \phi_y)^2}{n(n-1)}} \quad \text{Eq. VI.4}$$

Onde:

$|Z| \Rightarrow$ Valor médio do módulo da impedância

$|Z|_y \Rightarrow$ Valor do módulo de impedância medido para o elemento número y ($y=1, 2$ ou 3)

$\phi \Rightarrow$ Valor médio do ângulo de mudança da fase

$\phi_y \Rightarrow$ Valor do ângulo de mudança de fase medido para o elemento número y ($y=1, 2$, ou 3)

$\sigma \Rightarrow$ Medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio (desvio padrão)

$n \Rightarrow$ quantidade de elementos da bateria ($n=3$)

A título de exemplo a seguir são mostrados os cálculos dos valores médios do módulo da impedância e do ângulo de mudança da fase e respectivos desvios padrão, para o estado-de-carga (S) igual a 100%, na frequência 25,12 Hz.

Valores obtidos experimentalmente (Tabela VI.1):

$S = 100\%$

$f = 25,12 \text{ Hz}$

$|Z|_1 = 5,137.10^{-2} \Omega$

$|Z|_2 = 4,014.10^{-2} \Omega$

$|Z|_3 = 5,497.10^{-2} \Omega$

$\phi_1 = 0,2 \text{ grau}$

$\phi_2 = 0,4 \text{ grau}$

$\phi_3 = 0,2 \text{ grau}$

A partir das Equações VI.1 e VI.3:

$$|Z| = \frac{5,137.10^{-2} \Omega + 4,014.10^{-2} \Omega + 5,497.10^{-2} \Omega}{3} = 4,8827.10^{-2} \Omega$$

$$\sigma = \left(\frac{3 \left[(5,137.10^{-2} \Omega)^2 + (4,014.10^{-2} \Omega)^2 + (5,497.10^{-2} \Omega)^2 \right] - (4,8827.10^{-2} \Omega)^2}{3(3-1)} \right)^{1/2} = \pm 0,008 \Omega$$

valor do módulo da Impedância é:

$$0,8 \Omega$$

Equações VI.2 e VI.4:

$$\frac{4 \text{ grau} + 0,2 \text{ grau}}{3} = 0,3 \text{ grau}$$

$$\left[\frac{(0,4 \text{ grau})^2 + (0,2 \text{ grau})^2}{3(3-1)} - (0,3 \text{ grau})^2 \right]^{1/2} = \pm 0,1 \text{ grau}$$

valor do ângulo de mudança da fase é:

0,1 grau

dos módulos da impedância e dos ângulos de mudança da fase com a frequência:

Para ilustrar a variação com a frequência dos valores médios dos módulos da impedância e dos

de mudança da fase, os gráficos das Figuras VI.3 e VI.4 apresentam essas relações, para alguns

de carga.

esses exemplos representam o comportamento geral assumido pelos dados obtidos

mentalmente, em todos os estados-de-carga.

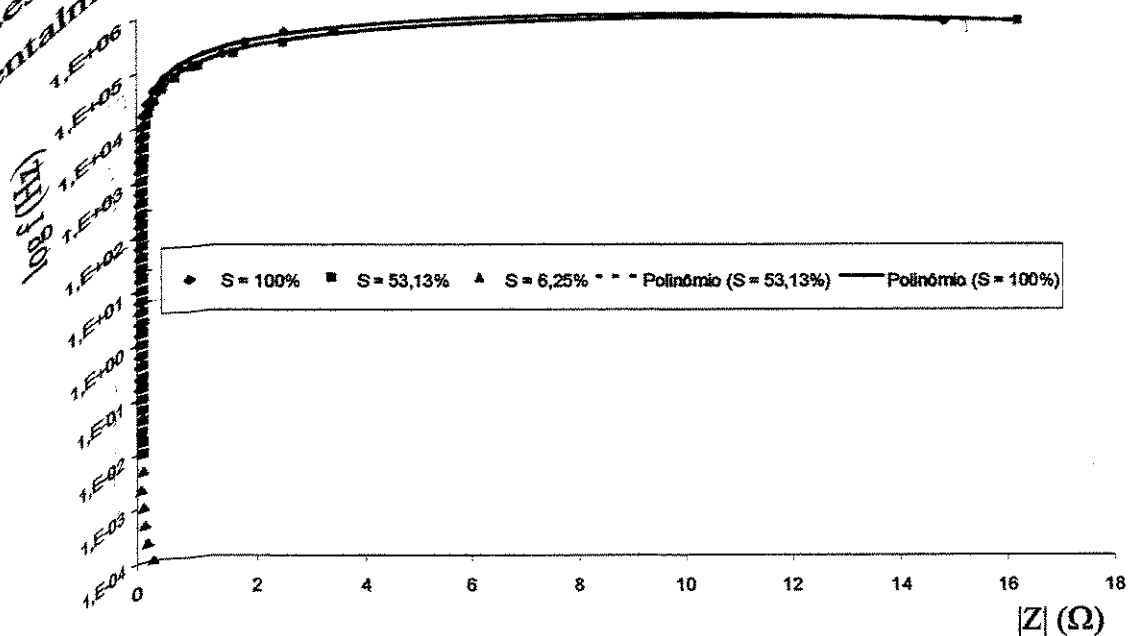


Fig. VI.3: Valores médios do módulo da impedância pela frequência, para alguns estados-de-carga.

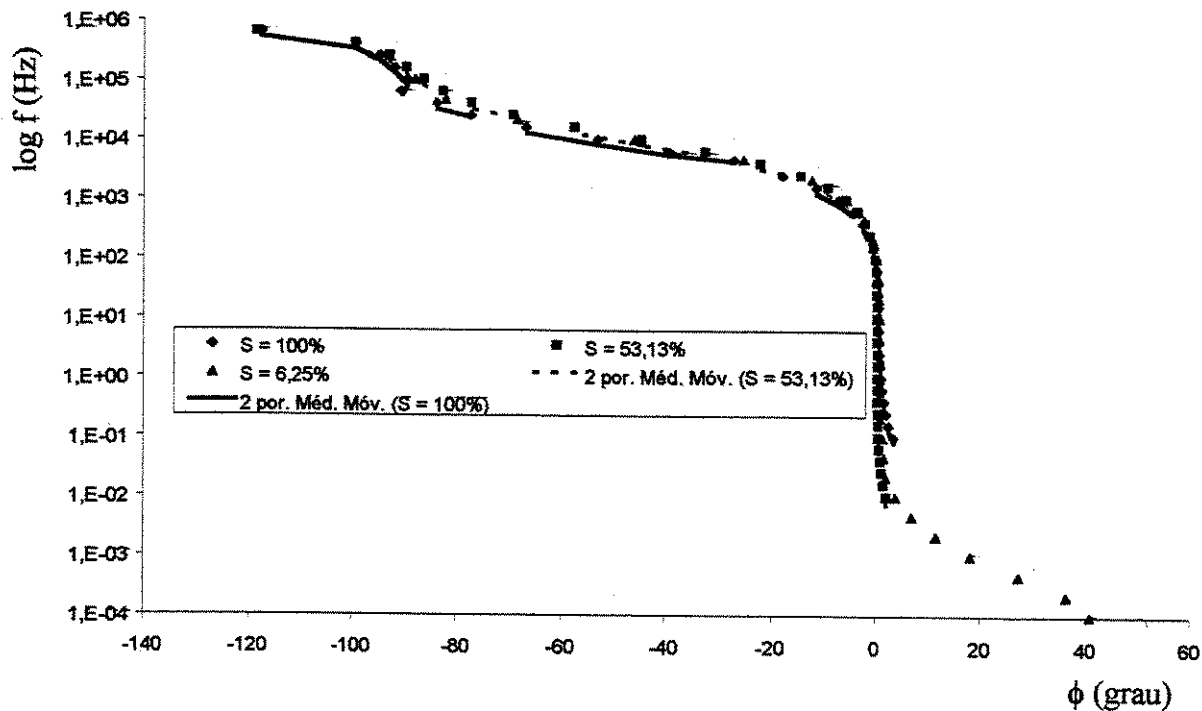


Fig. VI.4: Valores médios dos ângulos de mudança da fase pela frequência, para alguns estados-de-carga.

4.2. Tratamento dos dados e modelo matemático

A seguir é apresentada a metodologia aplicada no tratamento matemático dos dados de impedância obtidos experimentalmente (item 4.1 deste Capítulo). O objetivo deste tratamento é o de encontrar o parâmetro eletroquímico que apresente a melhor correlação com o estado-de-carga do acumulador.

a) Circuitos equivalentes:

Via de regra uma bateria pode ser representada por um dos circuitos equivalentes mostrados na Figura VI.3 [GOPIKANTH, 1979]:

- i. **Circuito R_p - C_p (Fig. VI.5.a):** Composto por uma fonte ideal de potencial (F) (isto é, sem impedância interna), em série com um circuito formado por uma reatância (C_p) (normalmente capacitiva), em paralelo com uma resistência (R_p);
- ii. **Circuito R_s - C_s (Fig. VI.5.b):** Composto por uma fonte ideal de potencial (F) (isto é, sem impedância interna), em série com uma reatância (C_s) (normalmente capacitiva) e com uma resistência (R_s).

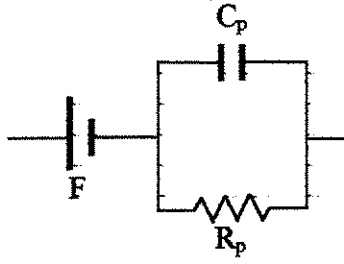
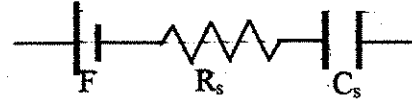
Fig. VI.5.a: Circuito equivalente R_p-C_p Fig. VI.5.b: Circuito equivalente R_s-C_s

Fig. VI.5: Circuitos eletrônicos equivalentes utilizados para acumuladores de energia. [GOPIKANTH, 1979]

A partir da teoria dos circuitos os vetores da impedância Z , para cada um desses circuitos equivalentes, podem ser calculados com base nas seguintes equações: [SATHYANARAYANA, 1978]

$$Z_{R_p-C_p} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p}$$

Eq. VI.5

$$Z_{R_s-C_s} = R_s + \frac{1}{j\omega C_s}$$

Eq. VI.6

Onde:

$Z_{R_s-C_s} \Rightarrow$ Vetor impedância calculado a partir do circuito equivalente R_s-C_s

$Z_{R_p-C_p} \Rightarrow$ Vetor impedância calculado a partir do circuito equivalente R_p-C_p

$\omega = 2\pi f$

$f \Rightarrow$ Frequência em Hz

$j = \sqrt{-1}$

Enquanto os ângulos de mudança da fase para cada um dos circuitos equivalentes da Figura VI.5, são dados por: [SATHYANARAYANA, 1978]

$$\cot g \phi_{R_s-C_s} = -\omega C_s R_s$$

Eq. VI.7

$$\cot g \phi_{R_p-C_p} = \frac{-1}{\omega C_p R_p}$$

Eq. VI.8

Onde:

$\phi_{R_s-C_s} \Rightarrow$ Ângulo de mudança da fase calculada a partir do circuito equivalente R_s-C_s

$\phi_{R_p-C_p} \Rightarrow$ ângulo de mudança da fase calculada a partir do circuito equivalente R_p-C_p

Supondo que os circuitos equivalentes apresentados na Figura VI.5 possam ser usados indistintamente para uma mesma bateria é possível afirmar que:

$$Z_{R_s-C_s} \approx Z_{R_p-C_p}$$

Eq. VI.9

$$\phi_{R_s-C_s} \approx \phi_{R_p-C_p}$$

Eq. VI.10

Dessa forma, das Equações de VI.5 a VI.10, é possível derivar as Equações de VI.11 a VI.14, que permitem calcular os valores dos elementos resistivos (R_p e R_s) e capacitivos (C_p e C_s), a partir dos módulos das impedâncias e dos ângulos de mudança da fase, obtidos experimentalmente (item 4.1 deste Capítulo).

$$R_p = \frac{|Z|}{\cos \phi}$$

Eq. VI.11

$$R_s = |Z| \cos \phi$$

Eq. VI.13

$$\frac{1}{\omega C_p} = \frac{|Z|}{\sin \phi}$$

Eq. VI.12

$$\frac{1}{\omega C_s} = |Z| \sin \phi$$

Eq. VI.14

Onde:

$|Z| \Rightarrow$ módulo da impedância

b) Cálculo dos valores das resistências dos circuitos em série e paralelo e seus desvios padrão:

Os valores dos elementos resistivos dos circuitos R_p - C_p e R_s - C_s foram calculados a partir dos valores médios dos módulos da impedância e dos ângulos de mudança da fase, utilizando-se as Equações VI.11 e VI.13, respectivamente.

Os valores dos desvios padrão dessas resistências foram determinados como descritos a seguir:

i. Desvios padrão das resistências (R_p) do circuito R_p - C_p :

$$\sigma_{R_p} = \sigma_{|Z|} \sigma_{\phi}$$

$$\sigma_{R_p 100\%; 25,12 \text{ Hz}} = 0,008 \, \Omega \times 0,001745 \text{ rad} = 0,00002 \, \Omega$$

ii. Desvios padrão dos elementos resistivos (R_s) do circuito R_s - C_s :

$$\sigma_{R_s} = \sigma_{|Z|} \sigma_{\phi}$$

$$\sigma_{R_s 100\%; 25,12 \text{ Hz}} = 0,008 \, \Omega \times 0,1 \text{ gr} 0,001745 \text{ au} = 0,00002 \, \Omega$$

iii. Cálculo de R_p :

Para o cálculo dos valores de R_p foi utilizada a Equação VI.11, como segue:

$$R_p = \frac{|Z|}{\cos \phi}$$

$$R_{p 100\%; 25,12 \text{ Hz}} = \frac{0,049 \, \Omega}{\cos (0,005236 \text{ rad})} = 0,04883 \, \Omega$$

Portanto $R_{p 100\%; 25,12 \text{ Hz}} = 0,04883 \pm 0,00002 \, \Omega$

iv. Cálculo de R_s :

Para o cálculo dos valores de R_s foi utilizada a Equação VI.9

$$R_s = |Z| \cos \phi$$

$$R_{s100\%, 25,12 \text{ Hz}} = 0,049 \, \Omega \times \cos (0,005236 \text{ rad}) = 0,04883 \, \Omega$$

$$\text{Portanto } R_{s100\%, 25,12 \text{ Hz}} = 0,04883 \pm 0,00002 \, \Omega$$

c) Cálculo dos valores das capacitâncias dos circuitos em série e paralelo e seus desvios padrão:

Os valores capacitivos dos circuitos R_p - C_p e R_s - C_s foram calculados a partir dos valores médios dos módulos da impedância e dos ângulos de mudança da fase, utilizando-se as Equações VI.12 e VI.14, respectivamente.

Os valores dos desvios padrão desses valores foram determinados como descritos a seguir:

i. Desvios padrão das capacitâncias (C_p) do circuito R_p - C_p :

Considerando-se a alta precisão do sistema eletrônico utilizado na obtenção dos dados o erro associado aos valores de ω , calculados a partir dos valores da frequência aplicada, foram desprezados. Dessa forma os desvios padrão dos valores de C_p foram calculados como demonstrado a seguir:

$$\sigma_{C_p} = \sigma_{|Z|} \sigma_{\phi}$$

$$\sigma_{C_p100\%, 25,12 \text{ Hz}} = 0,008 \, \Omega \times 0,001745 \text{ rad} = 0,00002 \text{ F}$$

ii. Cálculo das capacitâncias (C_p) do circuito R_p - C_p :

$$\frac{1}{\omega C_p} = \frac{|Z|}{\sin \phi} \Rightarrow C_p = \frac{\sin \phi}{\omega |Z|}$$

$$C_{p100\%, 25,12 \text{ Hz}} = \frac{\sin (0,005236 \text{ rad})}{1,578 \cdot 10^2 \cdot 0,049} = 0,00060 \text{ F}$$

$$\text{Portanto } C_{p100\%, 25,12 \text{ Hz}} = 0,00060 \pm 0,00002 \text{ F}$$

iii. Desvios padrão capacitâncias (C_s) do circuito R_s - C_s :

Considerando-se a alta precisão do sistema eletrônico utilizado na obtenção dos dados o erro associado aos valores de ω , calculados a partir dos valores da frequência aplicada, foram desprezados. Dessa forma os desvios padrão dos valores de C_s foram calculados como demonstrado a seguir:

$$\sigma_{Cs} = \sigma_{|Z|} \sigma_{\phi}$$

$$\sigma_{Cs100\%, 25,12 \text{ Hz}} = 0,008 \, \Omega \times 0,001745 \text{ rad} = 0,00002 \text{ F}$$

iv. Cálculo das capacitâncias (C_s) do circuito R_s - C_s :

$$\frac{1}{\omega C_s} = |Z| \sin \phi \Rightarrow C_s = \frac{1}{\omega |Z| \sin \phi}$$

$$R_{p100\%, 25,12 \text{ Hz}} = \frac{1}{1,578 \cdot 10^2 \cdot 0,049 \cdot \sin(0,005236 \text{ rad})} = 25,88039 \text{ F}$$

$$\text{Portanto } C_{s100\%, 25,12 \text{ Hz}} = 25,88039 \pm 0,00002 \text{ F}$$

d) Faixa de frequências observada:

Observando-se os valores obtidos para C_p nota-se que, para valores de frequência acima de 25 Hz a reatância indutiva começa a ser proeminente (como indicado pelos valores negativos de C_p). Desde que as componentes indutiva e capacitiva não podem ser separadas e tendo em vista os objetivos dessa dissertação, a análise dos dados obtidos experimentalmente limitou-se ao intervalo de frequências no qual a contribuição da reatância indutiva pode ser desprezada (abaixo de 25 Hz).

e) Variação de R_p , R_s , C_p e C_s com a frequência:

Para ilustrar a variação com a frequência dos valores de R_p , R_s , C_p e C_s os gráficos das Figuras de VI.6 a VI.13 apresentam essas relações para alguns estados-de-carga. Com base em tratamento estatístico foi calculada a melhor relação entre os pontos dos gráficos. Essa relação é a apresentada nas figuras.

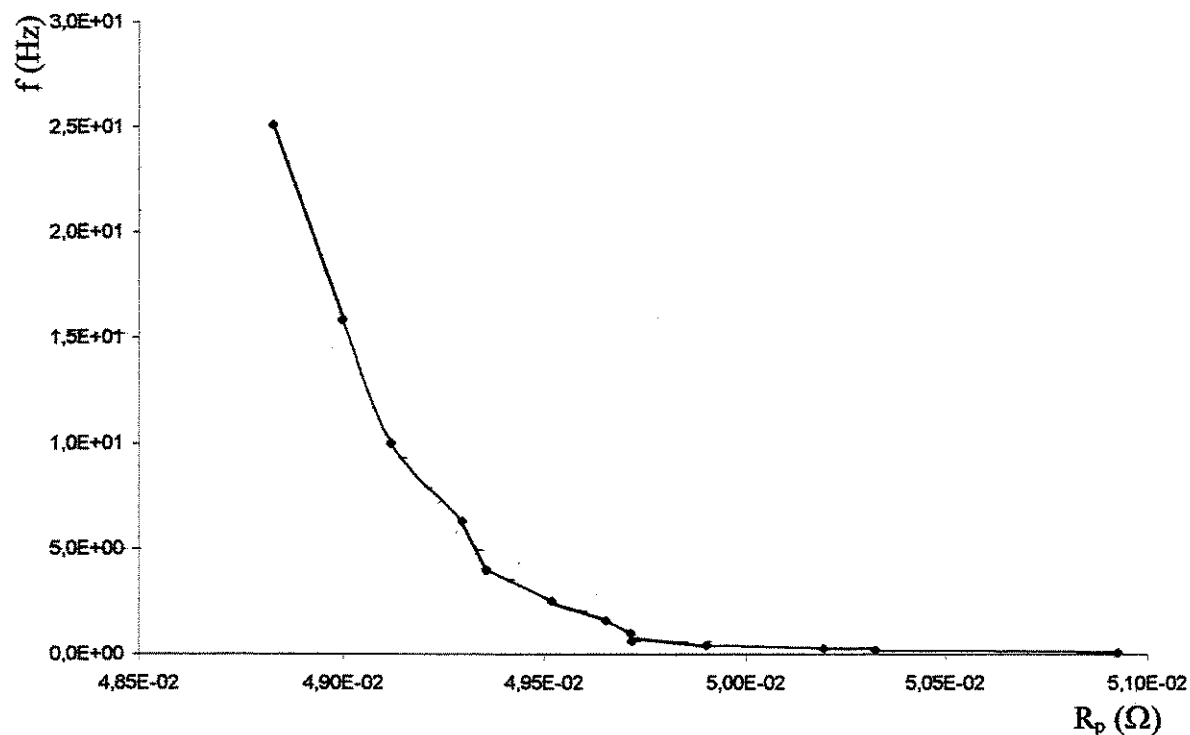


Fig. VI.6: Relação da resistência em paralelo (R_p) com a frequência, para $S = 100\%$.

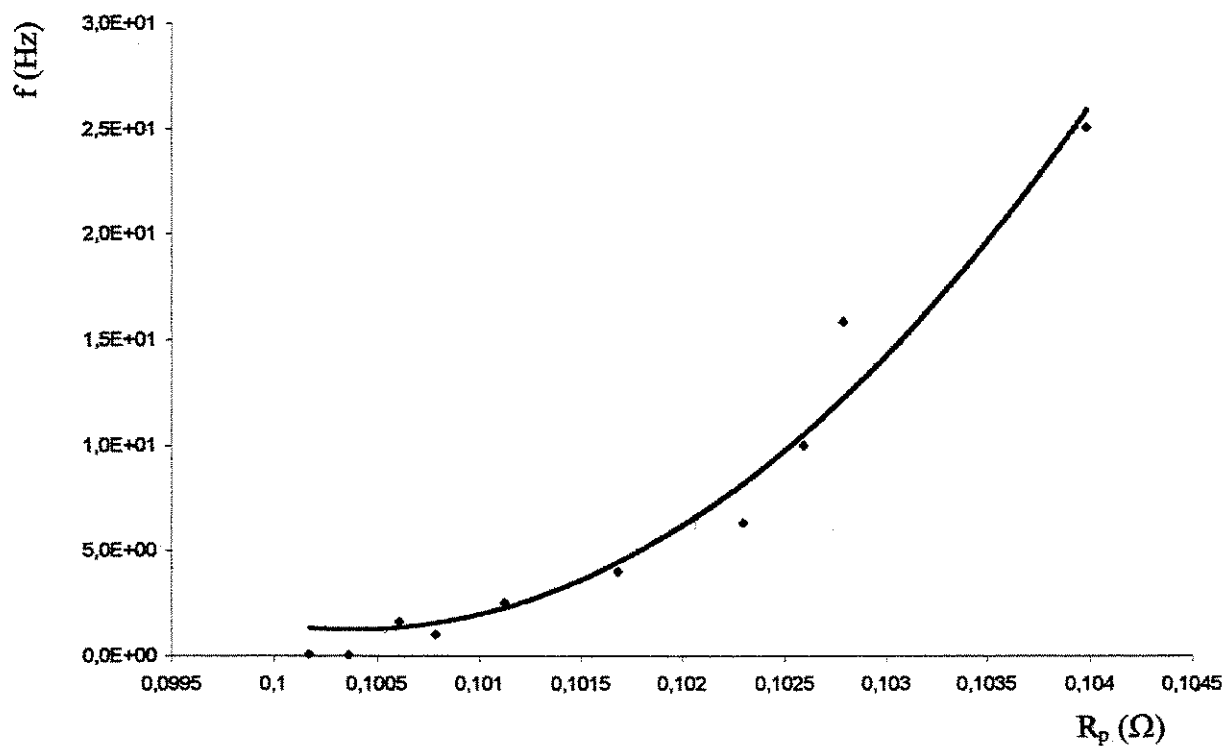


Fig. VI.7: Relação da resistência em paralelo (R_p) com a frequência, para $S = 53,13\%$.

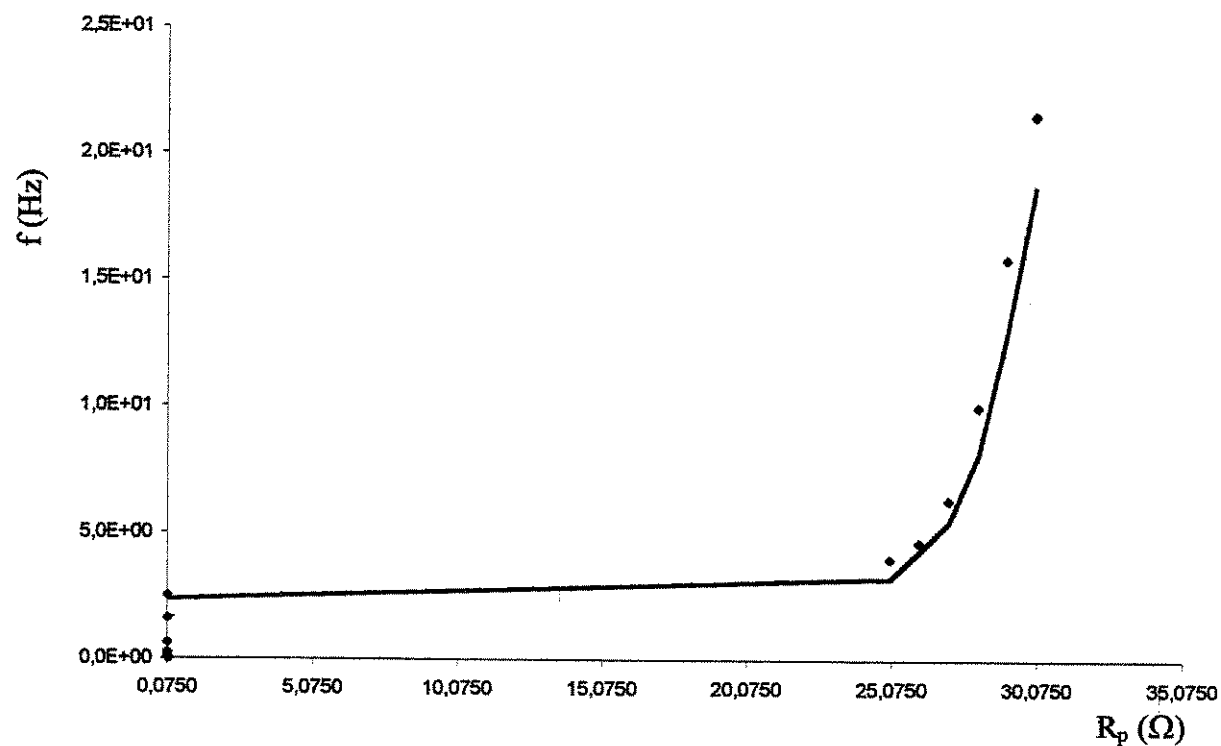


Fig. VI.8: Relação da resistência em paralelo (R_p) com a frequência, para $S = 0\%$.

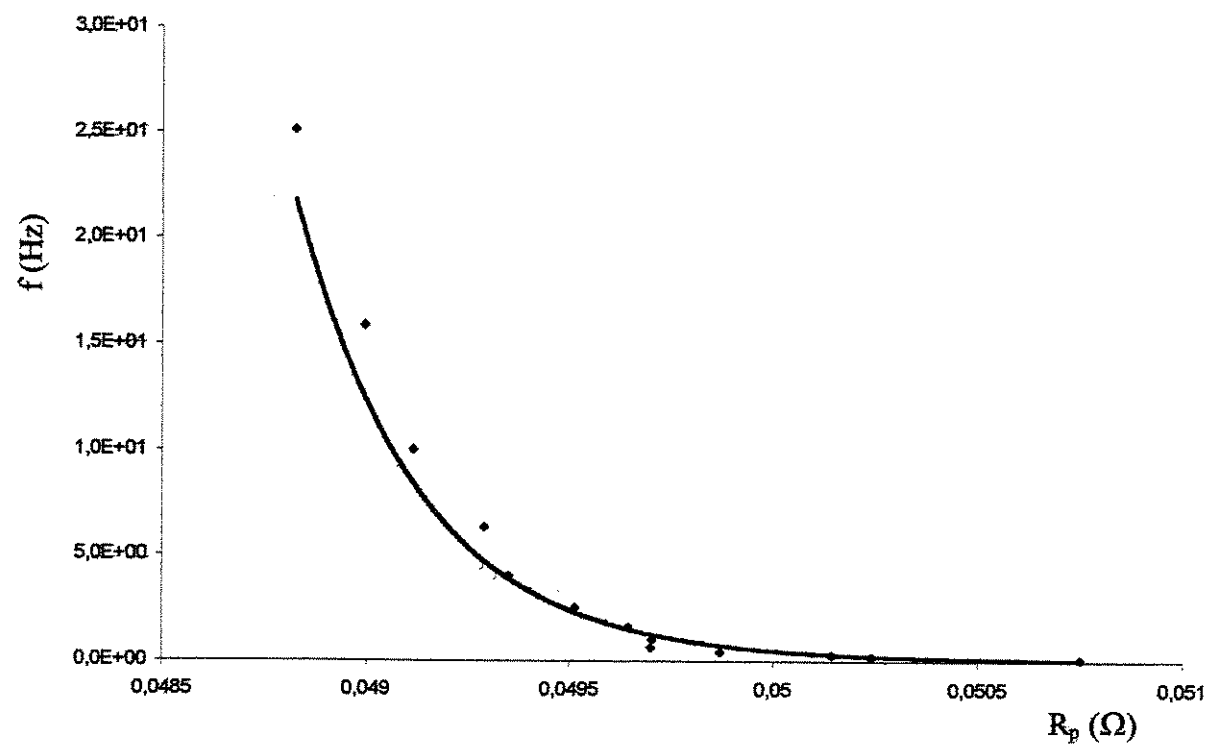


Fig. VI.9: Relação da resistência em série (R_s) com a frequência, para $S = 100\%$.

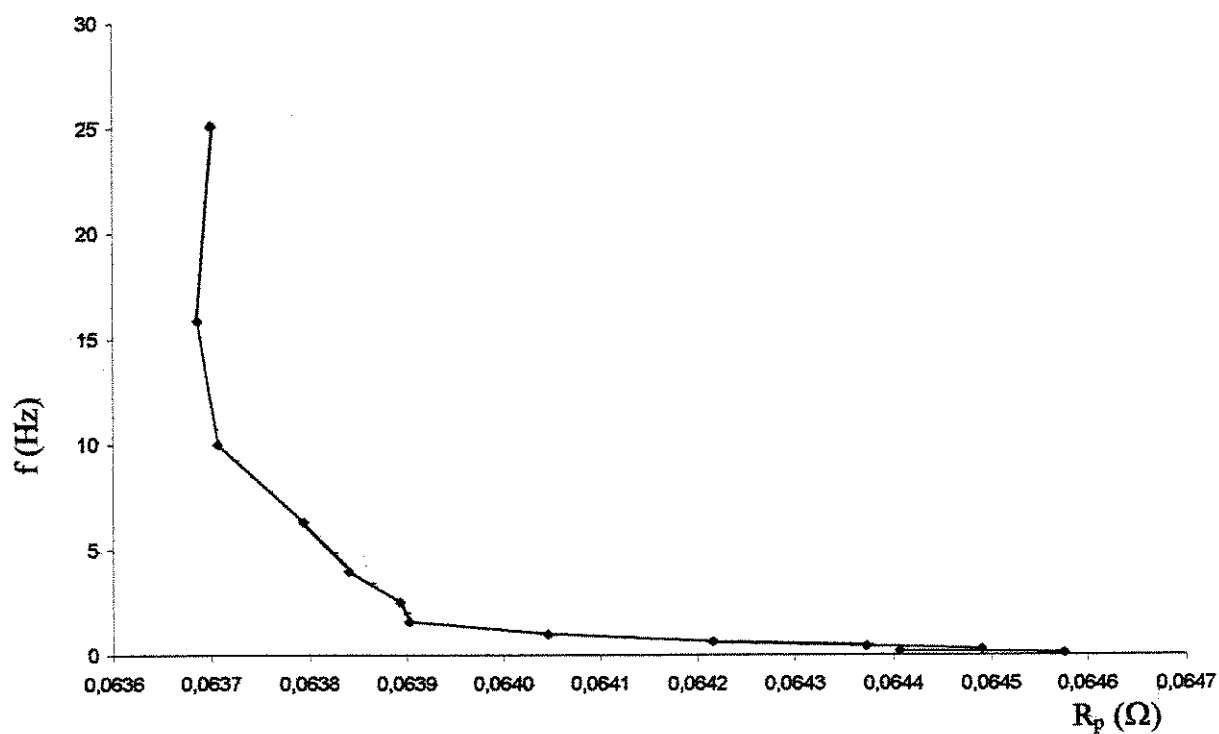


Fig. VI.10: Relação da resistência em série (R_s) com a frequência, para $S = 62,5\%$.

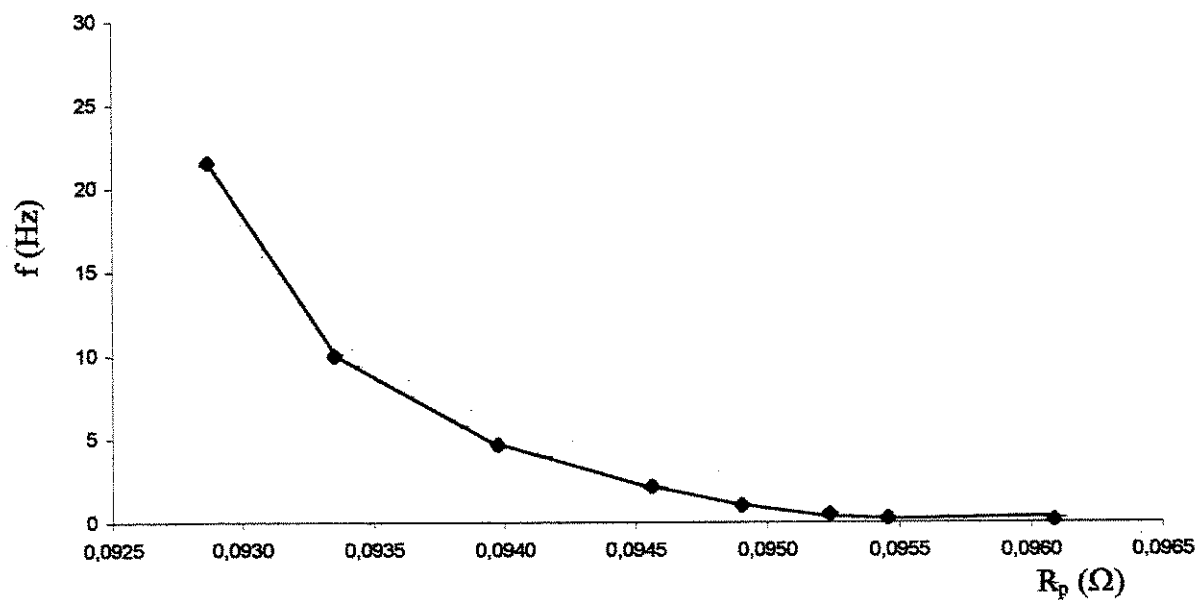


Fig. VI.11: Relação da resistência em série (R_s) com a frequência, para $S = 0\%$.

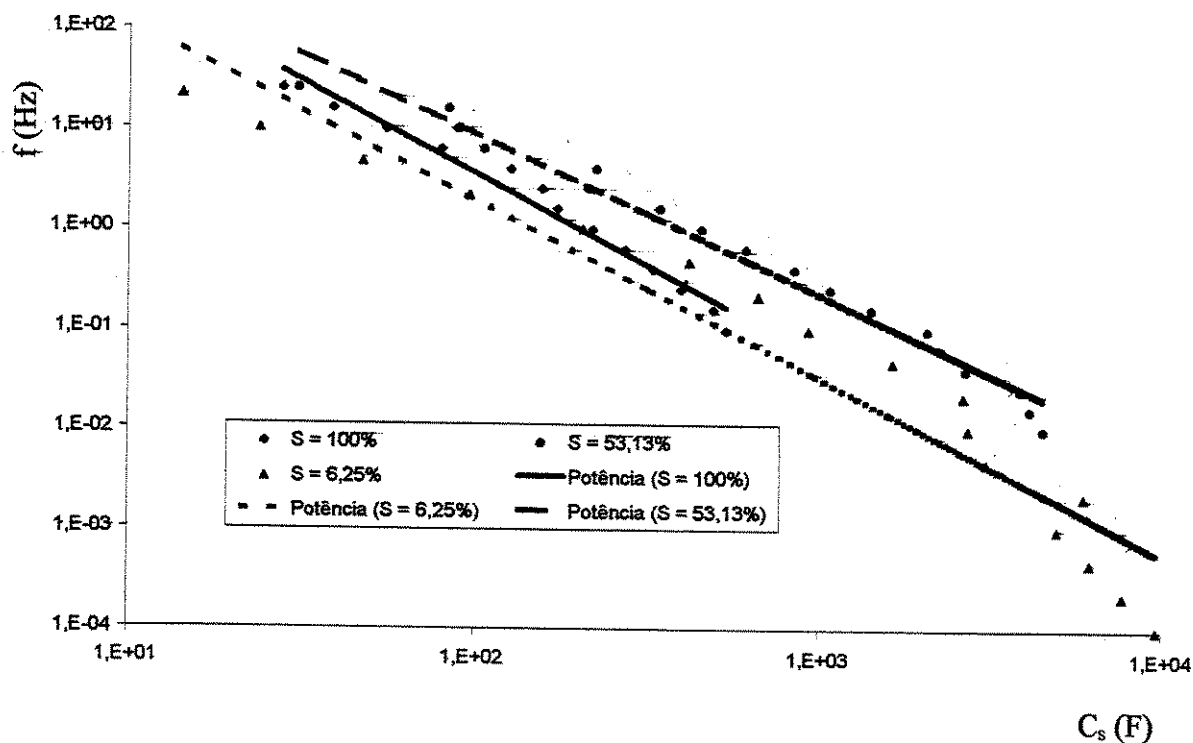


Fig. VI.12: Relação da capacitância em série (C_s) com a frequência, para $S = 100\%$, $53,13\%$ e $6,2\%$.

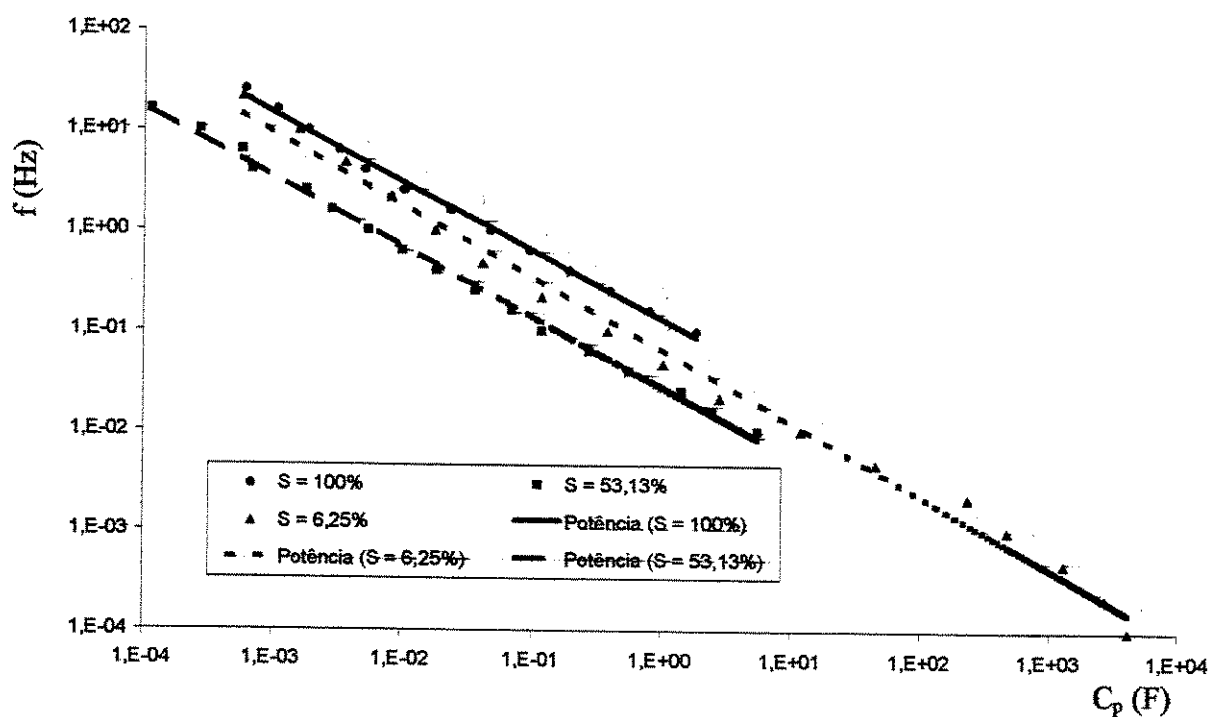


Fig. VI.13: Relação da capacitância em paralelo (C_p) com a frequência, para $S = 100\%$, $53,13\%$ e $6,25\%$.

5. Referências bibliográficas do Capítulo VI

[GOPIKANTH, 1979] "Impedance parameters and the state-of-charge. II. Lead-acid battery"

Gopikanth M. L. e Sathyanarayana S., Journal of Applied Electrochemistry, vol. 9, pp 371, 1979.

[SATHYANARAYANA,1978]

Capítulo VII

Discussão dos resultados

1. Introdução

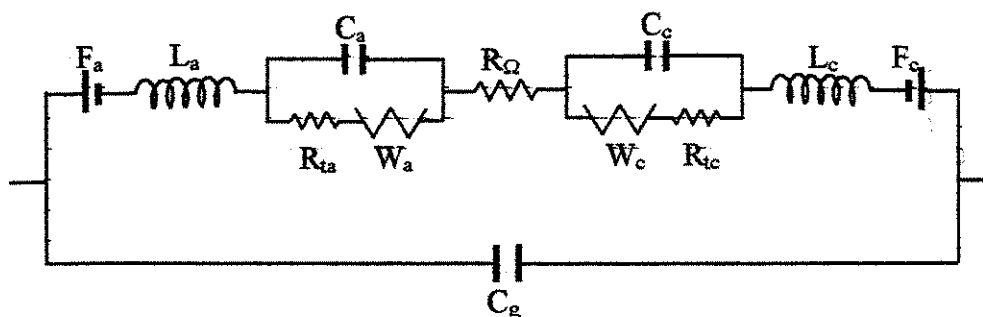
Neste capítulo são analisadas as relações entre os dados obtidos para os parâmetros eletroquímicos que caracterizam a bateria ($|Z|$, ϕ , R_s , R_p , C_s e C_p - Capítulo VI) e os estados-de-carga, com o objetivo de verificar a possibilidade de se conhecer a quantidade de carga disponível no acumulador em um dado momento, a partir desses parâmetros.

Porém, antes dessa análise, torna-se importante verificar se o modelo matemático adotado (item 4.2. do Capítulo VI), para o cálculo de R_s , R_p , C_s e C_p , são válidos para o acumulador estudado.

2. Teste do modelo matemático

Para uma análise da validade do modelo matemático adotado para o cálculo dos parâmetros eletroquímicos (item 4.2 do Capítulo VI) é necessário considerar que a impedância de cada eletrodo (pólos positivo e negativo) de um elemento da bateria terá contribuições dos processos de transferência de cargas e massa, da capacitância da dupla camada e da indutância dos condutores internos. Também deve ser considerado que a solução de eletrólito e os separadores contribuirão com componentes resistivos, para a impedância total da bateria. Finalmente existe uma contribuição capacitiva devida à distância entre os eletrodos, que pode ser chamada de “capacitância geométrica” [GOPIKANTH,1979].

As contribuições acima podem ser analisadas através do circuito equivalente clássico de Randles (ver item 2.2 do Capítulo III), para eletrodos simples [SLUYTERS-REHBACH,1971], o que transforma o circuito eletrônico equivalente de uma bateria no apresentado na Figura VII.1.



$E_a, E_c \Rightarrow$ Potencial do eletrodo simples
 $L_a, L_c \Rightarrow$ Indutância dos condutores internos
 $C_a, C_c \Rightarrow$ Capacitância das duplas camadas
 $R_{ta}, R_{tc} \Rightarrow$ Resistências da transferência de carga

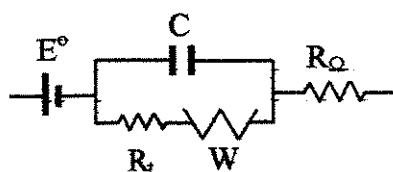
$W_a, W_c \Rightarrow$ Impedância difusional de Warburg
 $R_Q \Rightarrow$ Resistência do eletrólito e separador
 $C_g \Rightarrow$ Capacitância geométrica
 $a, c \Rightarrow$ Denotam anódico e catódico, respectivamente

Fig. VII.1: Circuito equivalente de Warburg para uma bateria.

As seguintes considerações podem ser feitas para simplificar o circuito equivalente da Figura VII.1:

- i. Desde que os eletrodos dos polos positivo e negativo apresentam mecanismos eletroquímicos similares as impedâncias individuais podem ser combinadas como se fossem apenas um eletrodo simples, resultando em uma impedância formada pelos valores das impedâncias das duplas camadas (C), resistências das transferências de cargas (R_t) e impedâncias das transferências de massa (W);
- ii. As medidas de impedância podem ser realizadas dentro de um intervalo de frequências onde as reatâncias indutivas (L_a e L_c) podem ser desprezadas (ver item 4.2.e. do Capítulo VI);
- iii. Para casos práticos de acumuladores, a capacitância geométrica (C_g) é várias ordens de grandeza menor que os valores de capacitância medidos, podendo ser omitida na maioria dos casos [GOPIKANTH,1979].

Com base nessas considerações a Figura VII.1 pode ser simplificada, resultando no circuito apresentado na Figura VII.2, que coincide com circuito equivalente de Randles.



$E^\circ = F_a - F_b \Rightarrow$ Potencial eletroquímico da bateria;
 $R_t \Rightarrow$ Resistência da transferência de carga;
 $W \Rightarrow$ Impedância difusional de Wargurg;
 $C \Rightarrow$ Capacitância da dupla camada;
 $R_Q \Rightarrow$ Resistência do eletrólito e separadores.

Fig. VII.2: Circuito equivalente simplificado para uma bateria.

De acordo com a teoria de circuito equivalente [SLUYTERS-REHBACH,1971], as propriedades da impedância do circuito de Randles baseiam-se nas Equações VII.1, VII.2 e VII.3 a seguir:

$$Z = R_s - \left(\frac{j}{\omega C_s} \right) \quad \text{Equação VII.1}$$

$$R_s = R_{\Omega} + \left[\frac{R_t + \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}}}{(1 + \sqrt{\omega C \sigma})^2 + \omega^2 C^2 \left(R_t + \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \right)^2} \right] \quad \text{Equação VII.2}$$

$$\frac{1}{\omega C_s} = \frac{\left(\frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \right) (1 + \sqrt{\omega C \sigma}) + \omega C \left(R_t + \frac{\sigma}{\omega} \right)^2}{(1 + \sqrt{\omega C \sigma})^2 + \omega^2 C^2 \left(R_t + \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \right)^2} \quad \text{Equação VII.3}$$

Onde σ é o coeficiente de Warburg.

As contribuições resistiva e reativa da impedância de Warburg no circuito equivalente da Figura VII.2, relacionam-se com a Equação VII.4 [SLUYTERS-REHBACH,1971]:

$$W = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} - j \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \quad \text{Equação VII.4}$$

Onde o valor de σ pode ser calculado, para casos específicos a partir da teoria da difusão, como por exemplo, quando existe uma difusão linear das espécies oxidadas (O) e reduzidas (R) em direção a um eletrodo plano. Neste caso, no potencial de equilíbrio da Reação VII.1, é válida a Equação VII.5.



$$\sigma = \frac{RT}{n^2 F^2 A \sqrt{2\omega}} \left[\frac{1}{C_O \sqrt{D_O}} + \frac{1}{C_R \sqrt{D_R}} \right] \quad \text{Equação VII.5}$$

Onde:

$A \Rightarrow$ Área ativa do eletrodo

C_O e $C_R \Rightarrow$ Concentrações das espécies oxidadas (O) e reduzidas (R), respectivamente

D_O e $D_R \Rightarrow$ Coeficientes de difusão das espécies oxidadas (O) e reduzidas (R), respectivamente

$R \Rightarrow$ Constante dos gases

$F \Rightarrow$ Constante de Faraday

$T \Rightarrow$ Temperatura absoluta

A resistência de transferência de carga (R_t) relaciona-se com a concentração através da corrente, de acordo com a Equação VII.6.

$$R_t = \left(\frac{RT}{nFI_0} \right) \quad \text{Equação VII.6}$$

Onde:

$I_0 \Rightarrow$ Corrente no potencial da etapa determinante da reação do eletrodo.

Dessa forma, em um sentido amplo, é possível afirmar que R_t e σ são dependentes do estado-de-carga da bateria através dos termos de concentração. Dessa afirmação e com base nas Equações de VII.1 a VII.4, deduz-se que a impedância da bateria, assim como seus parâmetros relacionados, R_s e C_s , também são dependentes do estado-de-carga.

Baseando-se nas Equações VII.2 e VII.3 *Sathyanarayana e colaboradores* [SATHYANARAYANA,1979] desenvolveram métodos que permitem avaliar diferentes parâmetros de um sistema eletroquímico. Em especial, se $(1/\omega C_s)$ é colocado em um gráfico em função de R_s , em diferentes frequências, é possível diferenciar entre um sistema eletroquímico comandado pelo processo de difusão ou de transferência de carga. Uma vez que, para um processo puramente difusional ($\omega \rightarrow 0$, Equações de VII.7 a VII.9), a curva resultante será uma reta com inclinação unitária e interceção em $[2\sigma^2 C - (R_\Omega + R_t)]$. No caso de um processo puramente de transporte de carga ($\sigma \rightarrow 0$, Equações de VII.10 a VII.12), a curva será um semi-círculo com diâmetro igual a R_t . Como demonstrado a seguir:

Se $\omega \rightarrow 0$,

$$\frac{1}{\omega C_s} = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} \quad \text{Equação VII.7}$$

$$R_s = R_\Omega + R_t + \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}} - 2\sigma^2 C \quad \text{Equação VII.8}$$

$$\frac{1}{\omega C_s} = R_s + 2\sigma^2 C - R_\Omega - R_t \quad \text{Equação VII.9}$$

Se $\sigma \rightarrow 0$,

$$\frac{1}{\omega C_s} = \frac{\omega C R_t^2}{1 + \omega^2 C^2 R_t^2} \quad \text{Equação VII.10}$$

$$R_s = \frac{R_\Omega + R_t}{1 + \omega^2 C^2 R_t^2} \quad \text{Equação VII.11}$$

$$\frac{1}{\omega^2 C^2} + \left(R_s - R_\Omega - \frac{R_t}{2} \right)^2 = \frac{R_t^2}{4} \quad \text{Equação VII.12}$$

Assumindo-se, portanto, a validade do circuito equivalente de Randles para os eletrodos da bateria estudada, em princípio é possível aplicar os limites apresentados nas Equações de VII.7 a VII.12 para avaliar os parâmetros R_Ω , C , R_t ou σ , estabelecendo-se o mecanismo da reação dos eletrodos e observando-se qualquer correlação entre o estado-de-carga do acumulador e os parâmetros da impedância: R_s , $(1/\omega C_s)$, $|Z|$ e ϕ .

Os gráficos das Figuras de VII.3 a VII.5 apresentam a relação de $(1/\omega C_s)$ com R_s para alguns estados-de-carga ($S = 100\%$, $62,5\%$ e $6,25\%$). As curvas sugerem semi-círculos, porém apresentam distorção na região de baixas frequências, o que indica o controle da transferência de carga modificado por alguma participação do controle difusional.

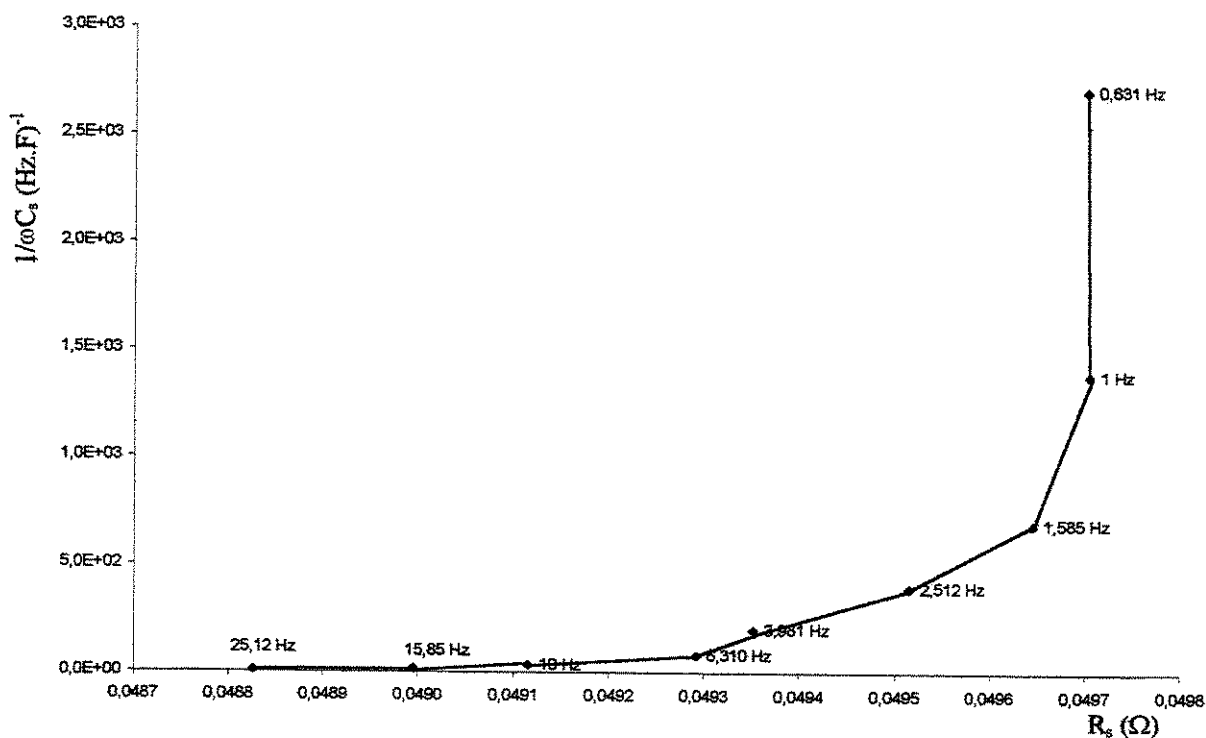
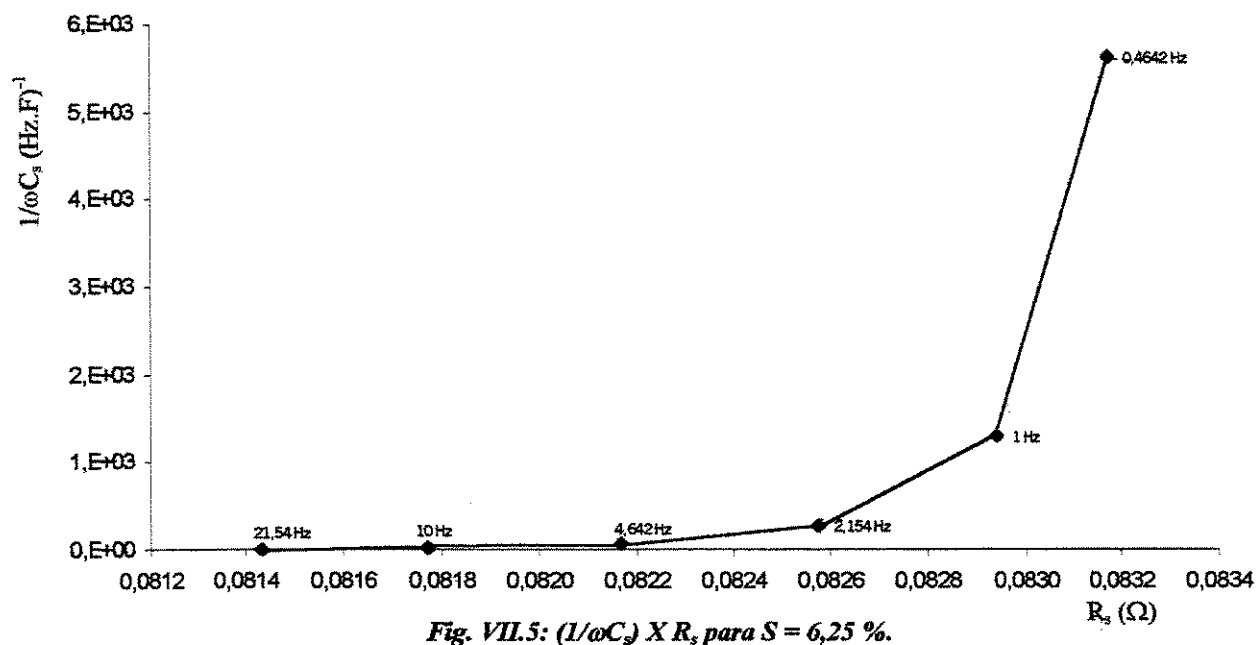
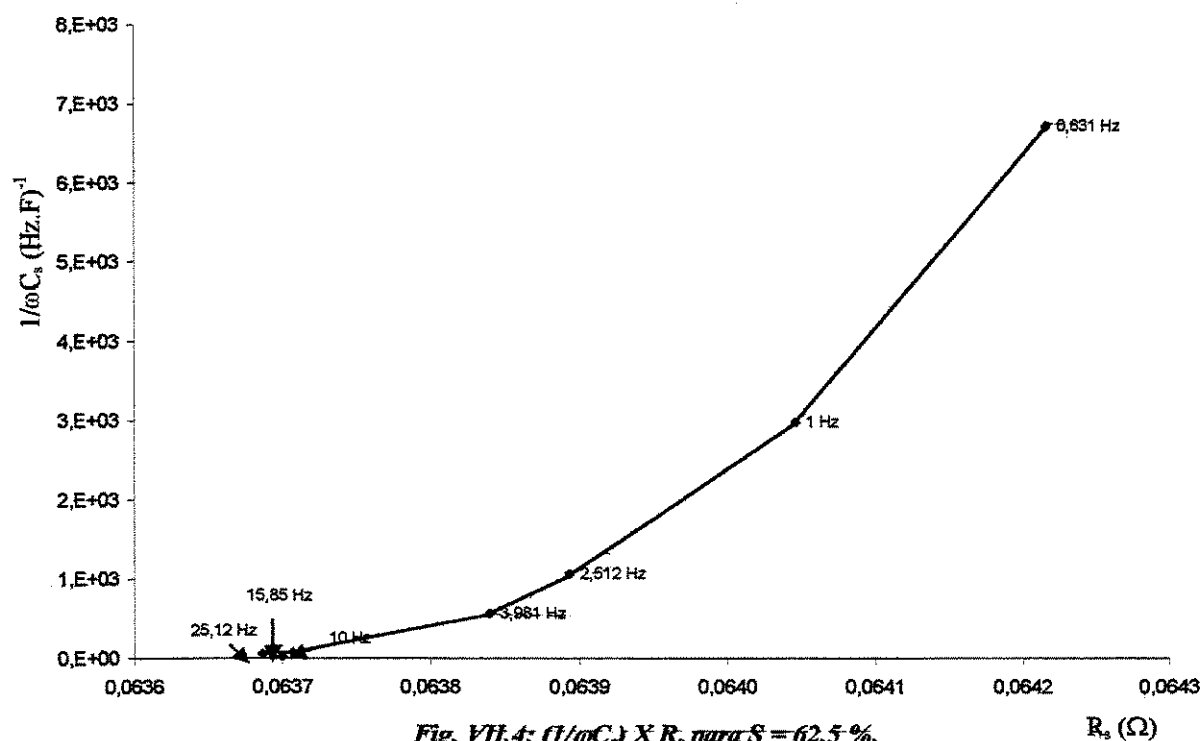


Fig. VII.3: $(1/\omega C_s) \times R_s$ para $S = 100\%$.



Se as curvas dos gráficos das Figuras de VII.3 a VII.5 forem aproximadas a semicírculos, isto é, próximas de um controle por transporte de carga puro (Equações de VII.7 a VII.9), é possível supor como válida a aproximação apresentada na Equação VII.13, onde a relação entre C_s e $(1/\omega^2)$ deveria ser uma reta, com intercepção positiva.

$$C_s \approx C + \frac{1}{\omega^2 CR_t^2}$$

Equação VII.13

Porém as curvas apresentadas no gráfico da Figura VII.6, mostram que os pontos não estão alinhados.

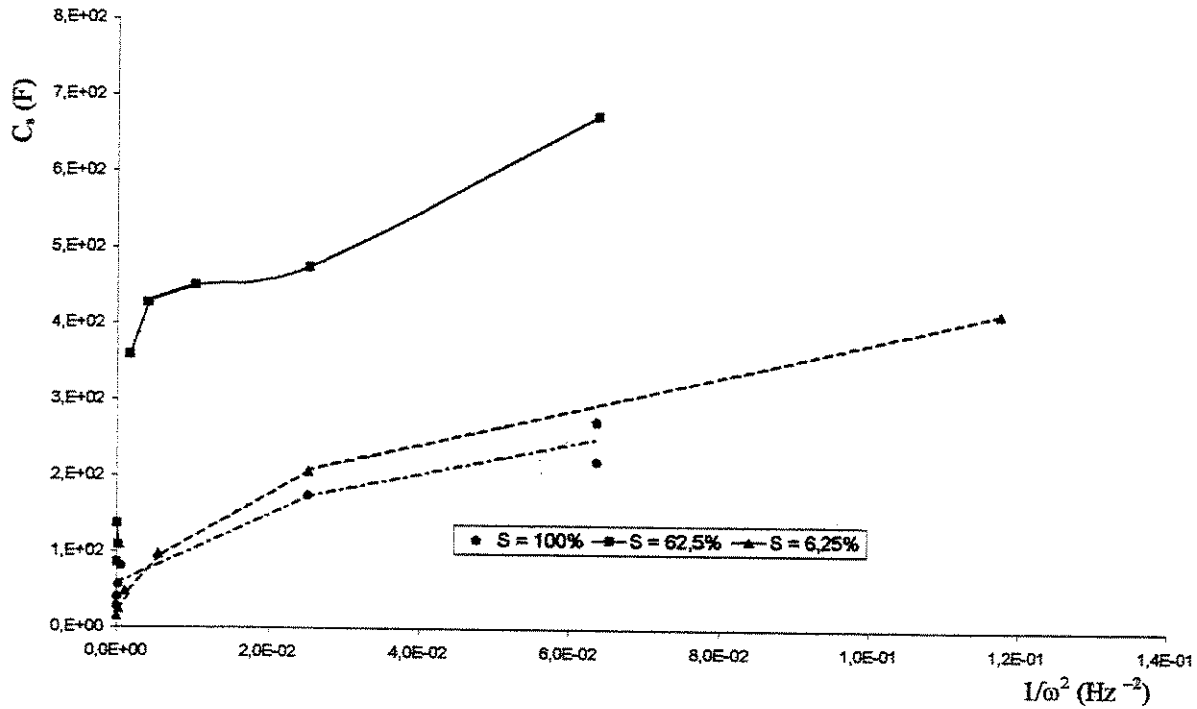


Fig. VII.6: $C_s \times (1/\omega^2)$ para $S = 100\%$, $62,5\%$ e $6,25\%$.

Desde que a massa ativa dos eletrodos de uma bateria chumbo-ácida é porosa, é possível melhorar o modelo introduzindo os elementos essenciais dos eletrodos porosos no circuito equivalente de Radles, conforme proposto por *Gopikanth e colaboradores* [GOPIKANTH,1979]. Para tanto se supõe que os eletrodos são constituídos de um grande número de tubos uniformes, longos e cilíndricos, cheios com a massa ativa saturada de eletrólito.

Nesse modelo o análogo elétrico de cada poro do eletrodo poroso é uma impedância distribuída do tipo transmissão de linha uniforme, conforme caracterizada na Figura VII.7.

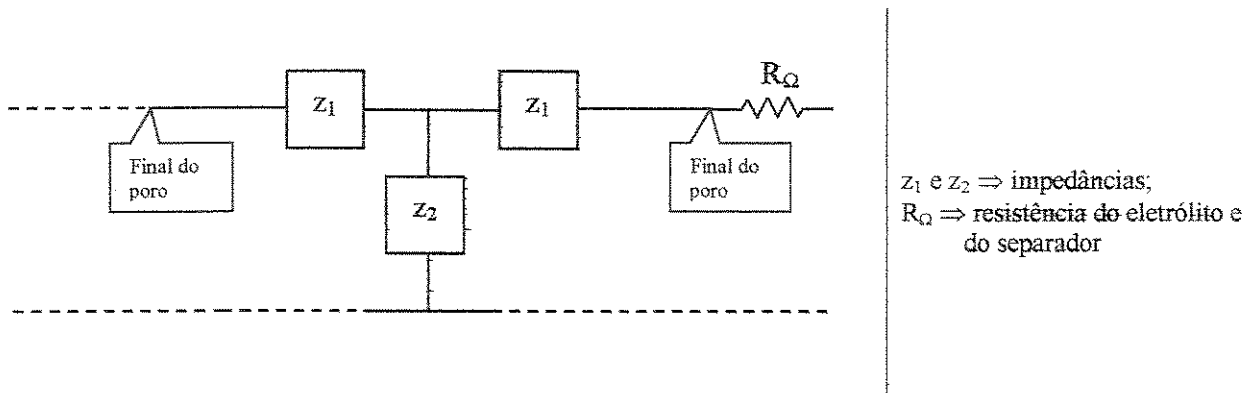


Fig. VII.7: Modelo de transmissão de linha de um poro em um eletrodo poroso.

Como a profundidade dos poros dos eletrodos das baterias chumbo-ácidas é muito maior que seu diâmetro, a impedância complexa do material ativo saturado de eletrólito é obtida da teoria de transmissão linear e representada pela Equação VII.14 [GOPIKANTH,1979], uma vez que R_Ω encontra-se fora dos poros e, portanto, não é parte da impedância do eletrodo.

$$Z_0 = \sqrt{z_1 z_2}$$

Equação VII.14

Também deve ser assumido que as impedâncias dos eletrodos anódico e catódico devem ser acrescentadas à impedância de Randles, o que parece ser razoável uma vez que não foram ainda consideradas de outra forma.

Após o desenvolvimento matemático da equação VII.14 e tomando-se apenas a contribuição reativa da impedância (a contribuição resistiva apenas é representativa na impedância da bateria se R_Ω for muito grande, além dessa resistência não ser sensível ao estado-de-carga), obtém-se a Equação VII.15 para a expressão da impedância da bateria [GOPIKANTH,1979].

$$\frac{NA}{\omega C_s} = \sqrt{\frac{\sigma_1 R_t (\sqrt{2} - 1)}{2\sqrt{\omega}}}$$

Equação VII.15

Onde:

$N \Rightarrow$ número de poros cilíndricos por unidade de área do eletrodo;

$A \Rightarrow$ área do eletrodo.

De acordo com a Equação VII.15 o gráfico de C_s contra $(1/\omega^{3/4})$ deve resultar em uma linha reta passando pela origem.

As relações entre C_s ($1/\omega^{3/4}$), obtidas a partir dos dados experimentais para diferentes estados-de-carga, são apresentadas nas Figuras de VII.8 a VII.10. Os gráficos mostram uma boa concordância dos dados experimentais com a teoria, conforme representado pelos valores de R^2 , calculados para as retas ($R^2 = 0,8816$ para $S = 100 \%$, $R^2 = 0,9451$ para $S = 62,5 \%$ e $R^2 = 0,9961$ para $S = 6,25 \%$). O que

permite afirmar que o modelo adotado no item 4.3.a. do capítulo VI, pode ser considerado bom para a bateria estudada, desde que considerada a porosidade da massa ativa de seus eletrodos.

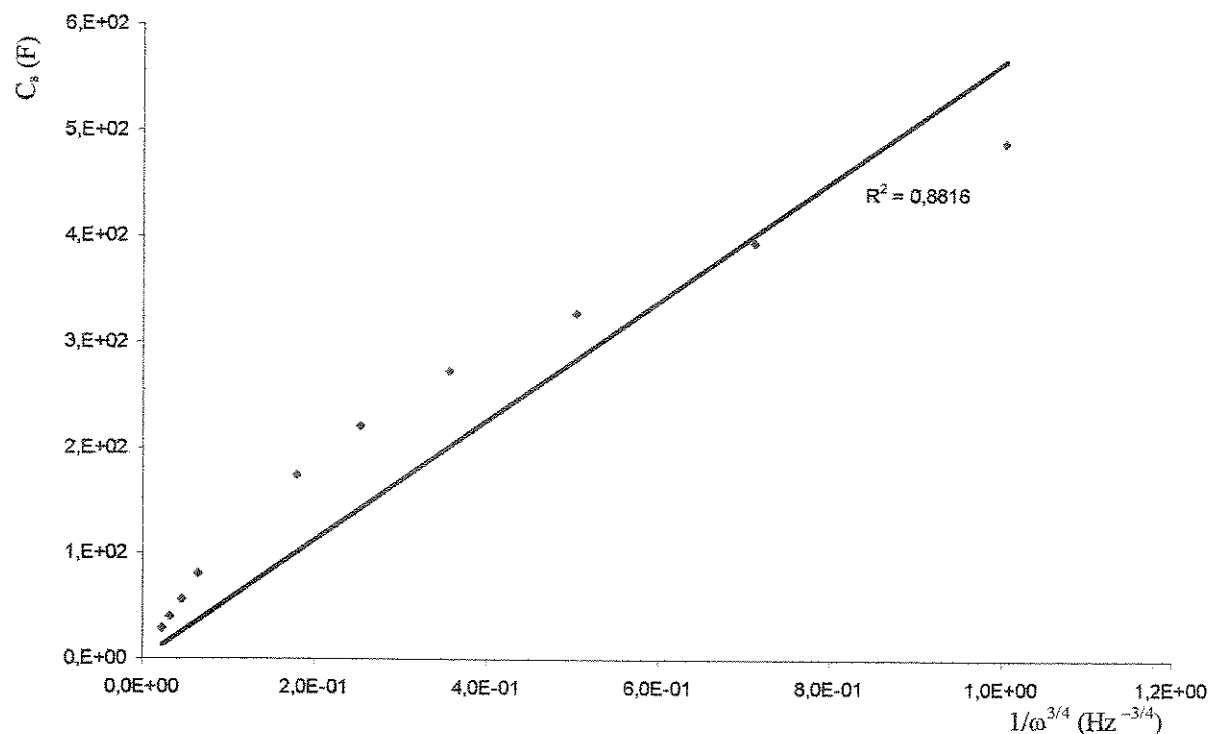


Fig. VII.8: $C_s X (1/\omega^{3/4})$ para $S = 100\%$.

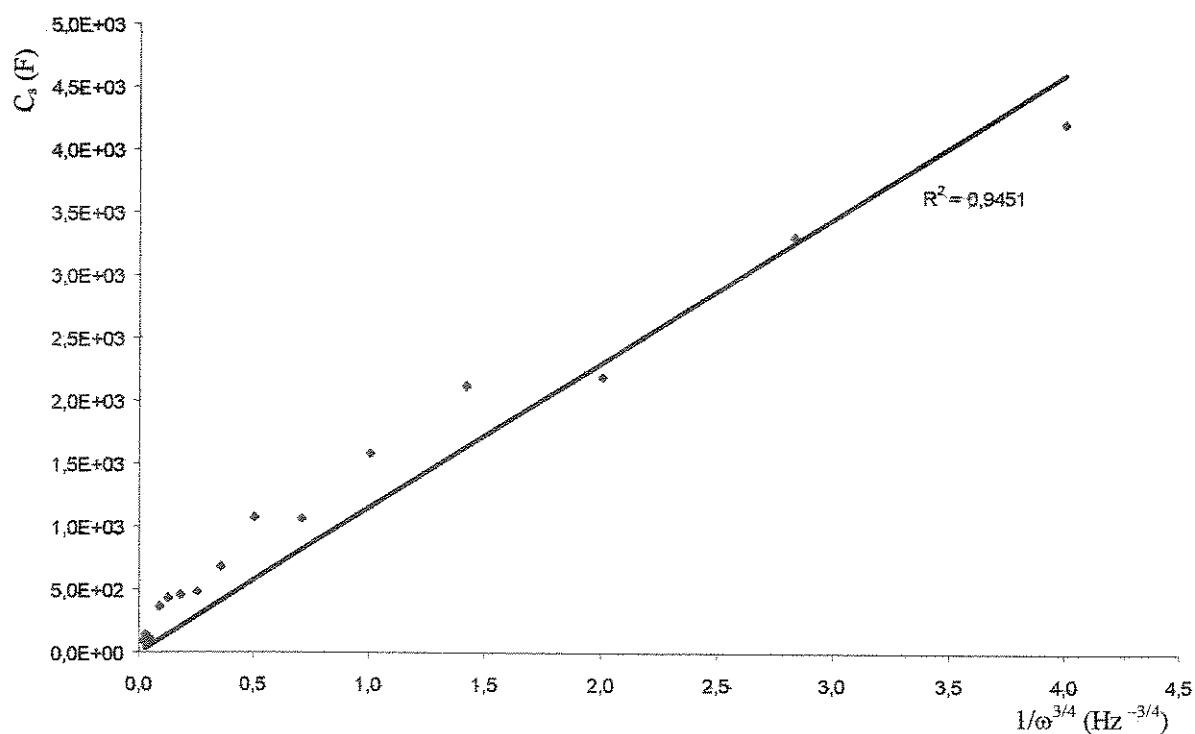


Fig. VII.9: $C_s X (1/\omega^{3/4})$ para $S = 62,5\%$.

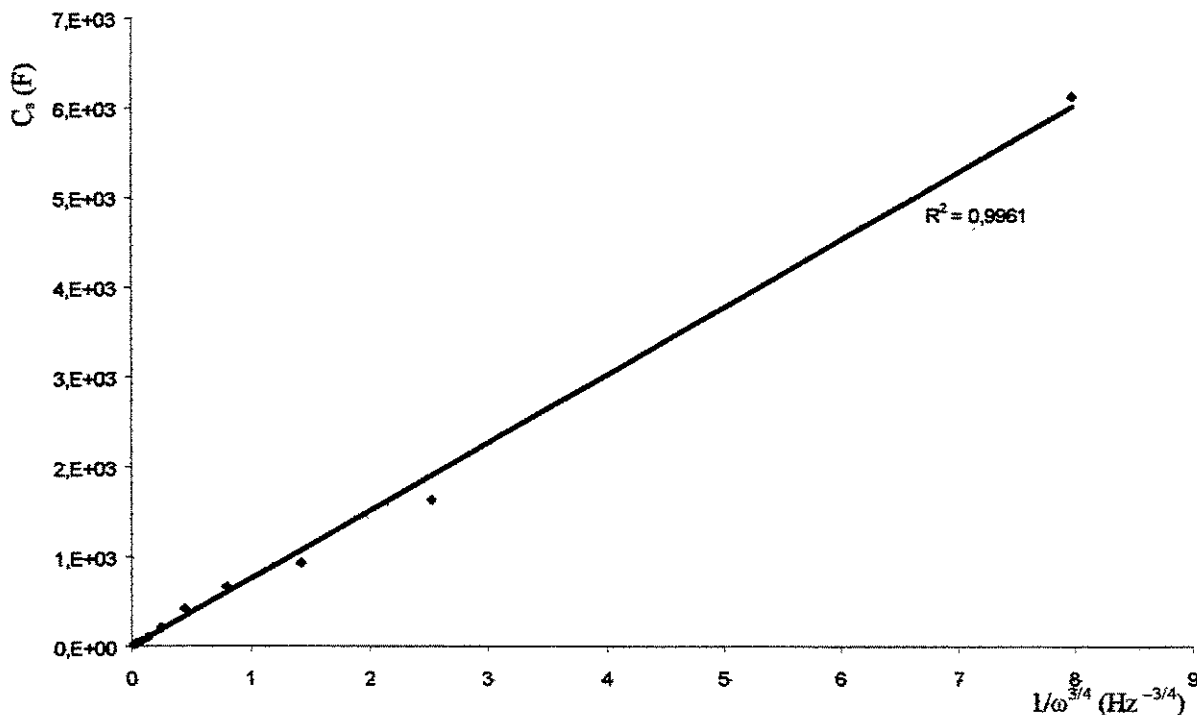


Fig. VII.10: $C_s \times (1/\omega^{3/4})$ para $S = 6,25 \%$.

3. Análise das correlações dos parâmetros eletroquímicos com o estado-de-carga

Uma análise do modelo proposto no item 4.3.a. do Capítulo VI leva à conclusão de que a resistência do eletrólito (R_Ω) deve ser um termo dominante no módulo da impedância ($|Z|$), na resistência em série (R_s) e na resistência em paralelo (R_p) e que, portanto, as flutuações no valor dessa resistência podem mascarar qualquer relação de $|Z|$, R_s e R_p com o estado-de-carga da bateria. Esta conclusão é importante principalmente para o caso das baterias chumbo-ácidas, cujos componentes do eletrólito participam da reação eletroquímica de carga e descarga, como exposto no item 2.3 do Capítulo I. Portanto, neste caso, espera-se grandes variações na resistividade do eletrólito com a variação do estado-de-carga.

Com base nessa observação resta analisar as relações entre os ângulos das mudanças de fase (ϕ), a capacitância em série (C_s) e a capacitância em paralelo (C_p), com o estado-de-carga.

Os estados-de-carga (S) em função dos ângulos de mudança da fase (ϕ) para alguns valores de frequência, são apresentados nos gráficos das Figuras de VII.11 a VII.13. Enquanto as Figuras de VII.14 a VII.16 e de VII.17 a VII.19 apresentam os estados-de-carga (S) contra os valores de C_s e C_p , respectivamente.

Os ângulos de mudança da fase (ϕ) apresentam uma relação polinomial de ordem múltipla com o estado-de-carga, o que leva a diferentes valores dessa grandeza para um mesmo estado-de-carga. Por esse motivo ϕ não pode ser utilizado para estimar a quantidade de carga disponível em uma bateria chumbo-ácida, a partir de seus valores.

A capacitância em série (C_s) apresenta, com boa aproximação, uma relação linear com o estado-de-carga da bateria. Desta forma uma vez conhecida a equação da reta, torna-se possível estimar a quantidade de carga disponível na bateria a partir da determinação do valor de C_s .

Semelhante à variação do ângulo de fase, a capacitância em paralelo não apresenta uma relação com o estado-de-carga que permita estimar, com boa precisão, a carga disponível em uma bateria chumbo-ácida a partir da determinação de seus valores.

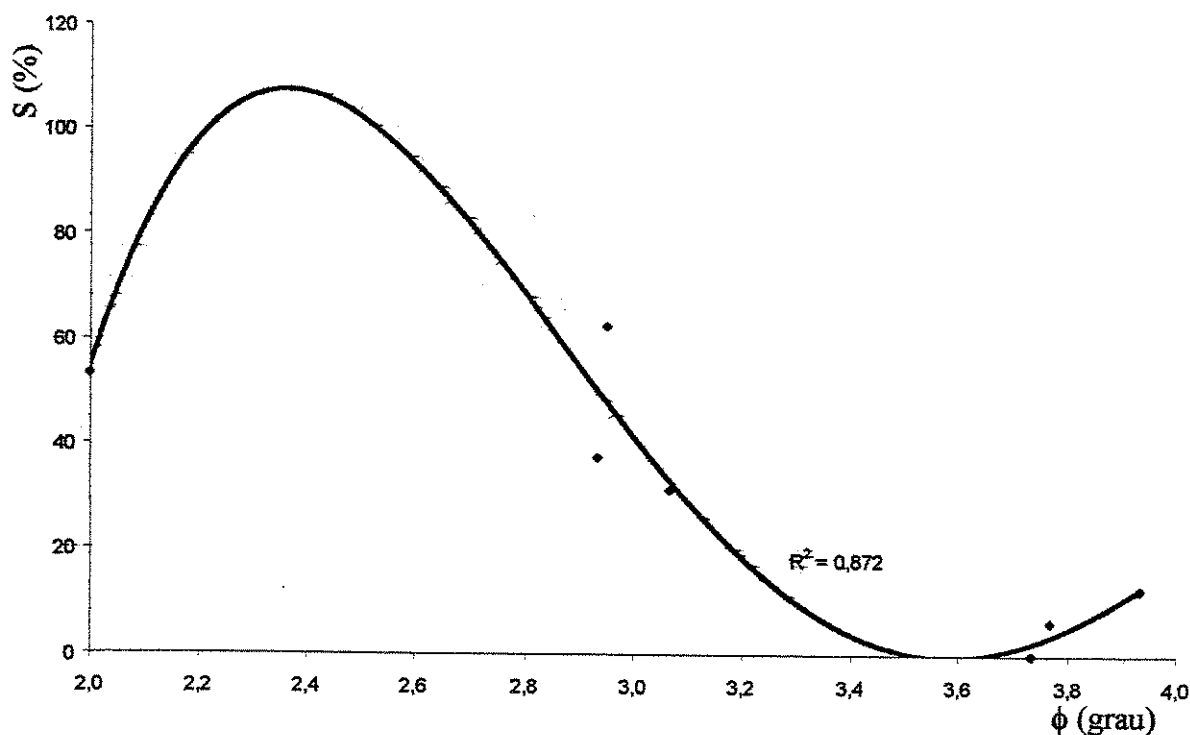
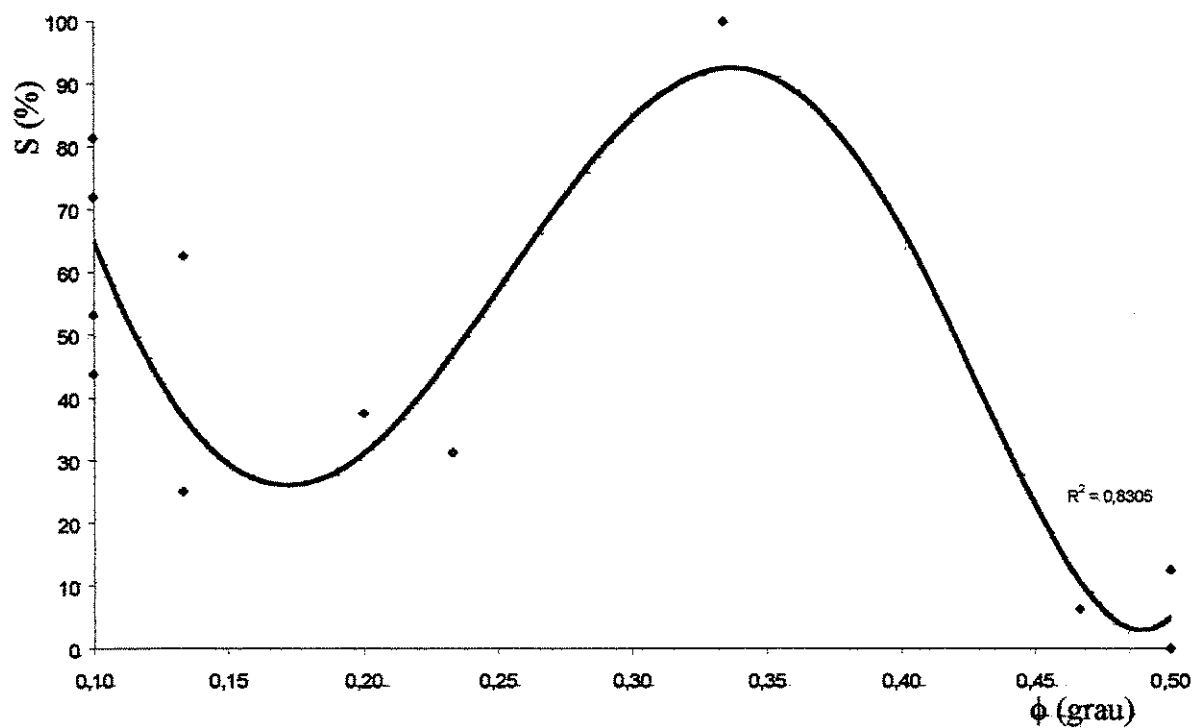
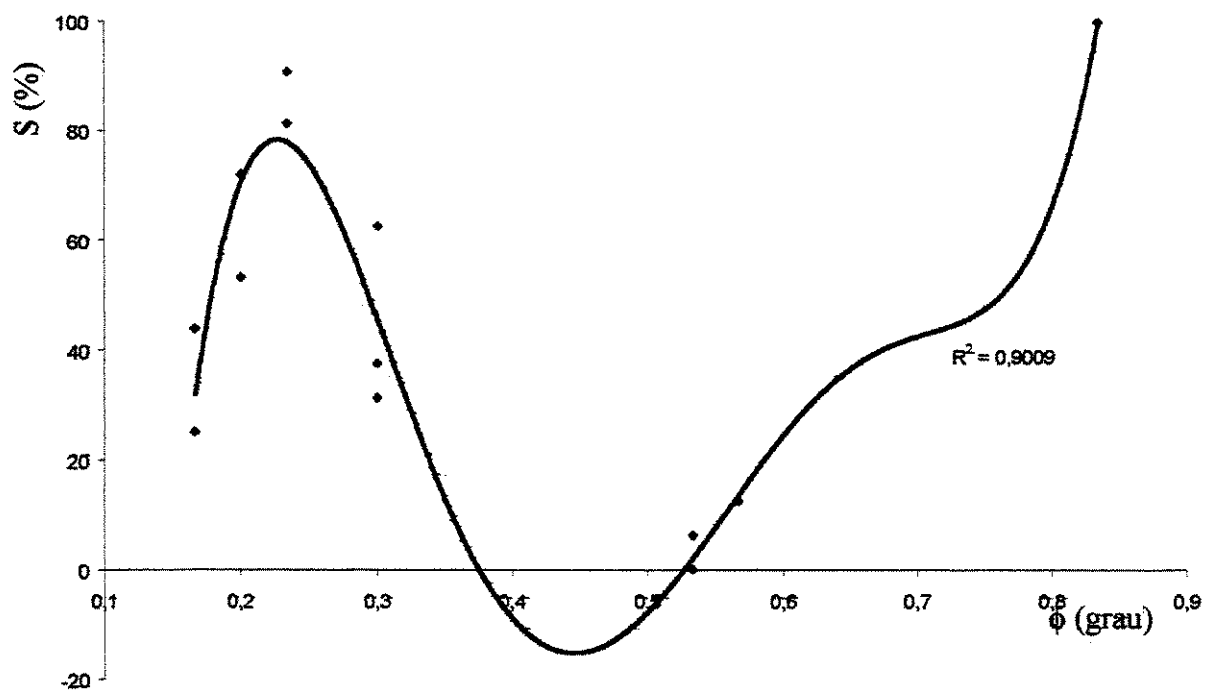


Fig. VII.11: Estado-de-carga pelo ângulo de mudança da fase em $f = 0,1$ Hz



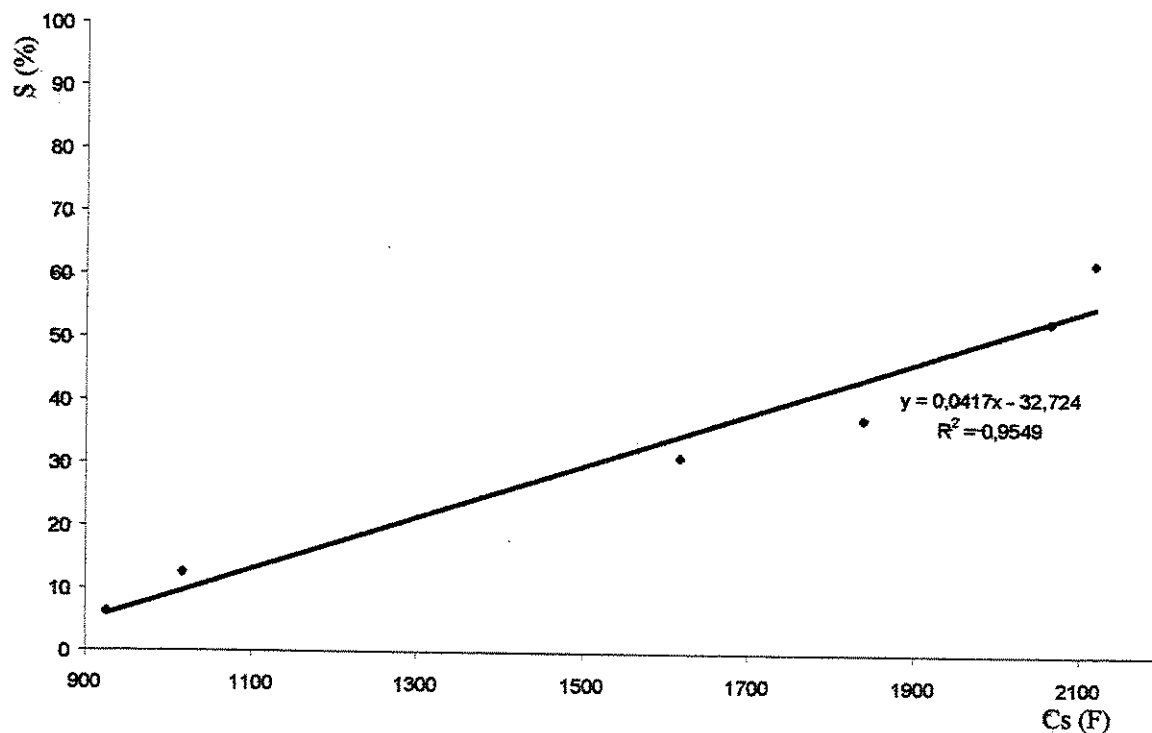


Fig. VII.14: Estado-de-carga pela capacitância em série para $f = 0,1$ Hz.

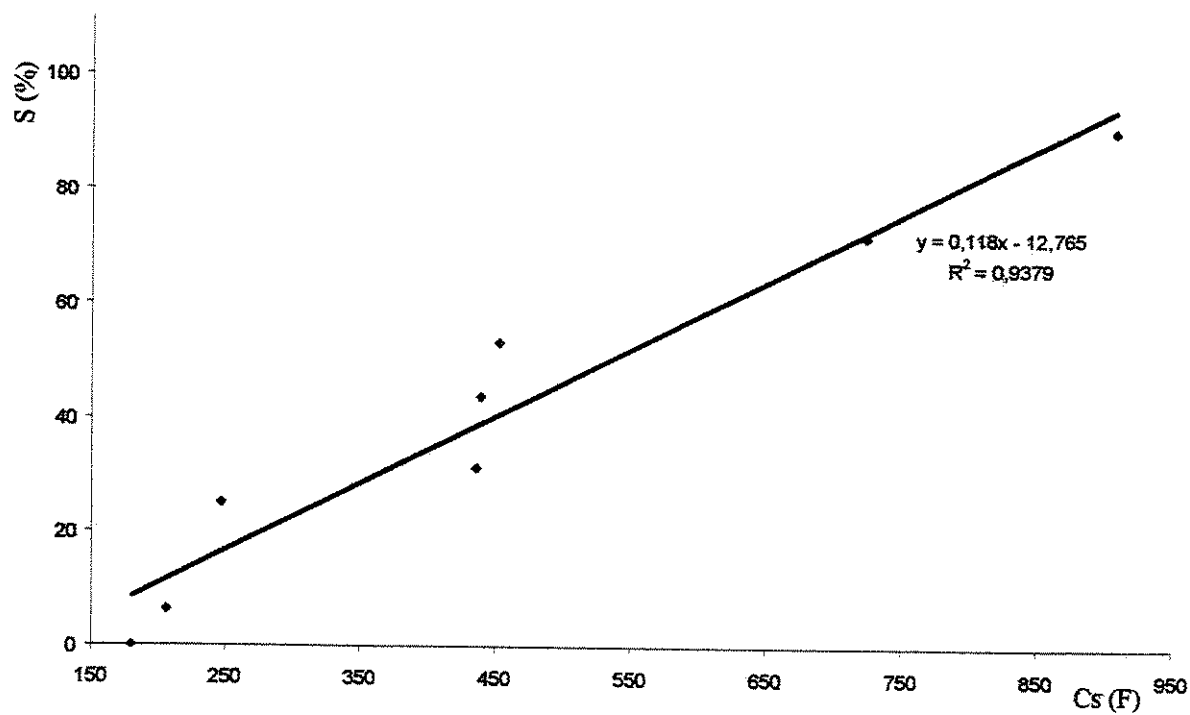


Fig. VII.15: Estado-de-carga pela capacitância em série para $f = 1$ Hz.

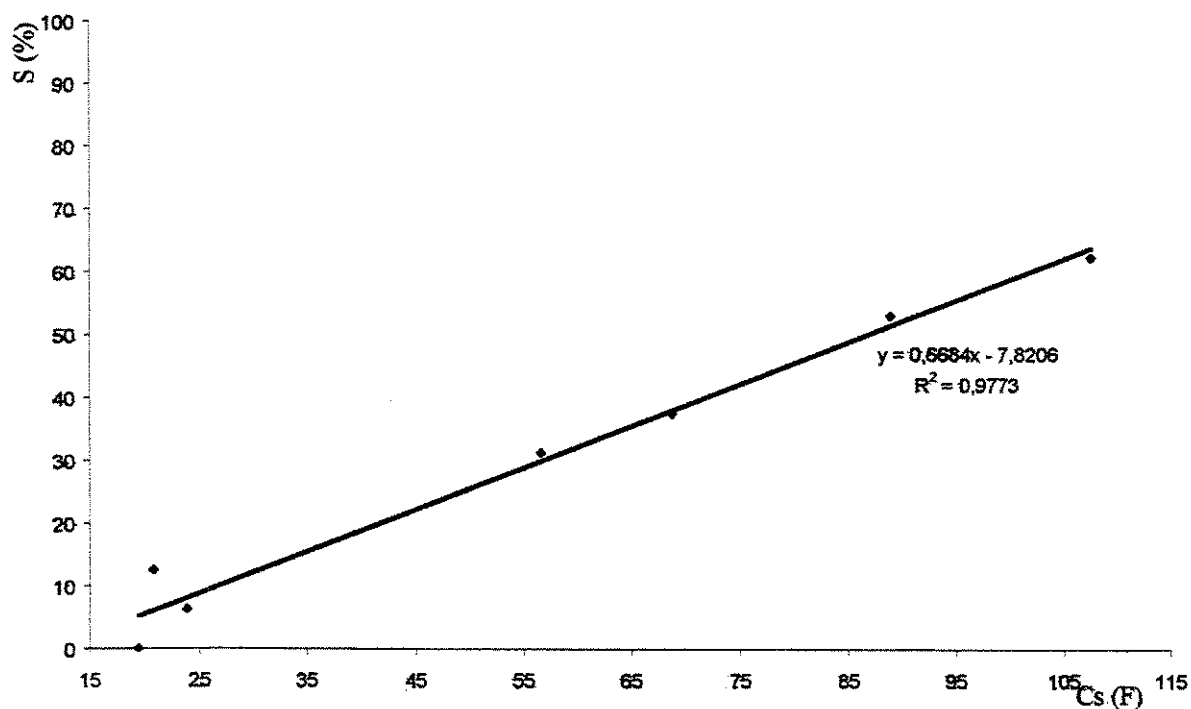


Fig. VII.16: Estado-de-carga pela capacitância em série para $f = 10 \text{ Hz}$.

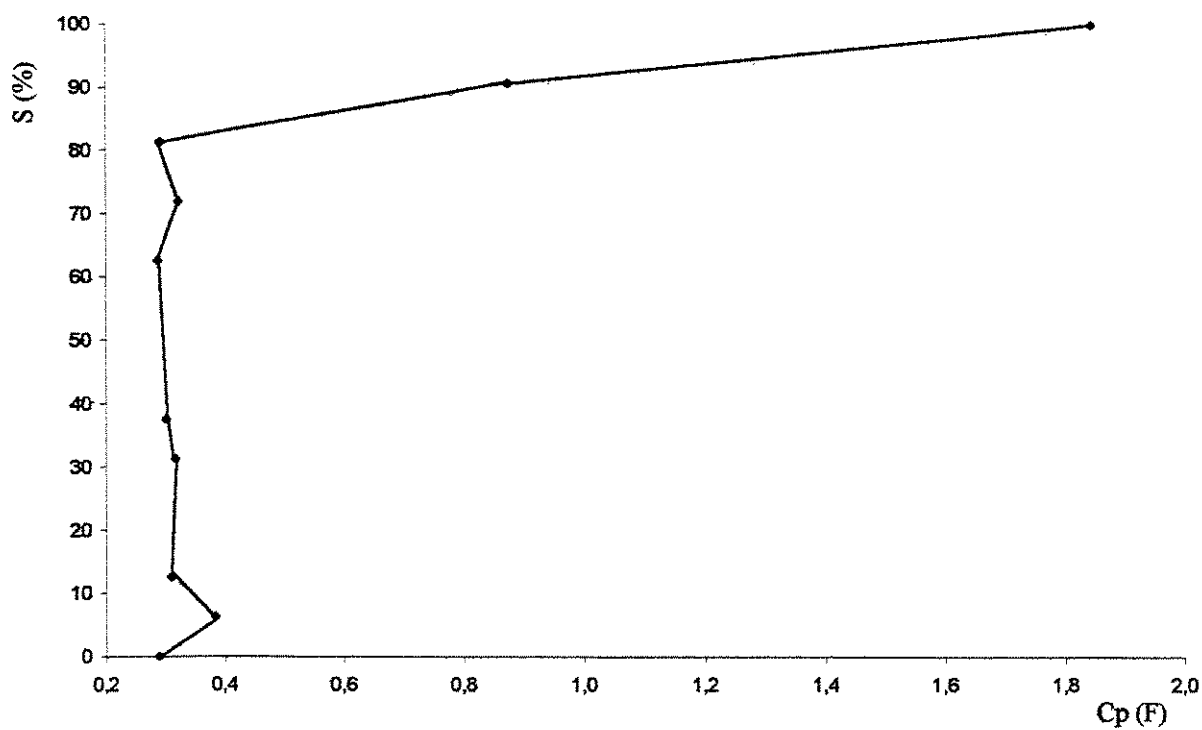


Fig. VII.17: Estado-de-carga pela capacitância em paralelo para $f = 0,1 \text{ Hz}$.

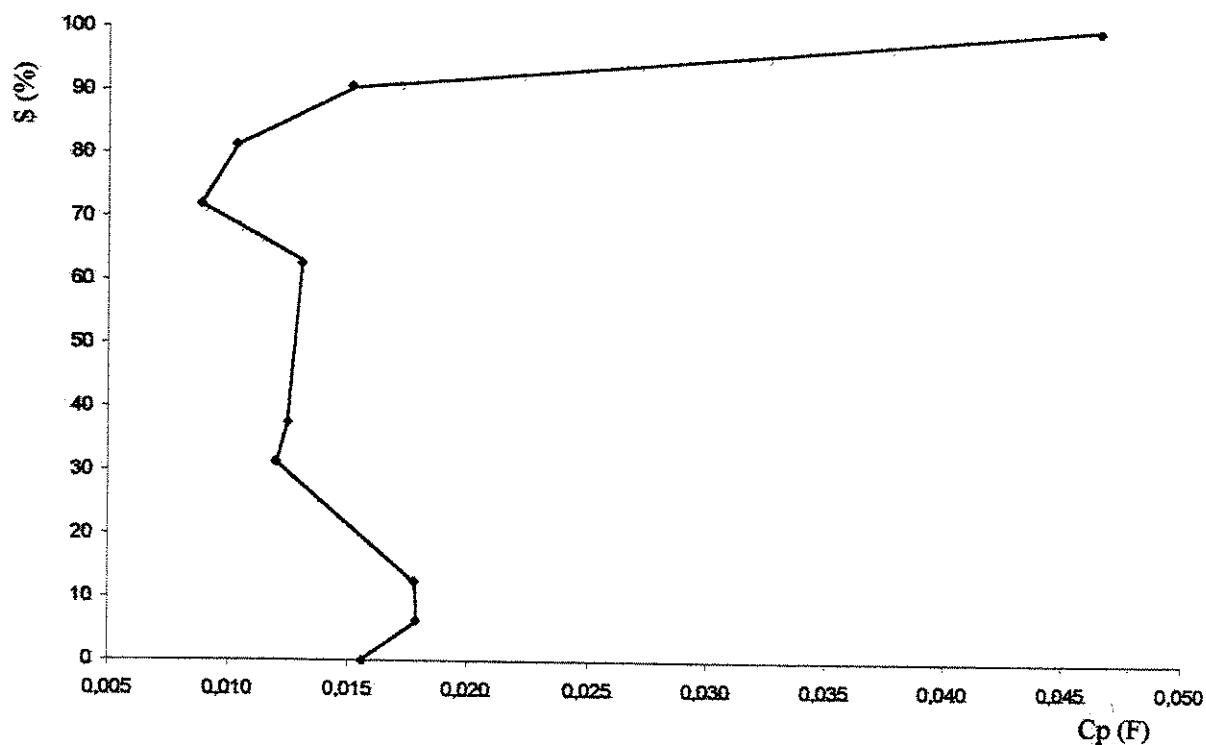


Fig. VII.18: Estado-de-carga pela capacitância em paralelo para $f = 1$ Hz.

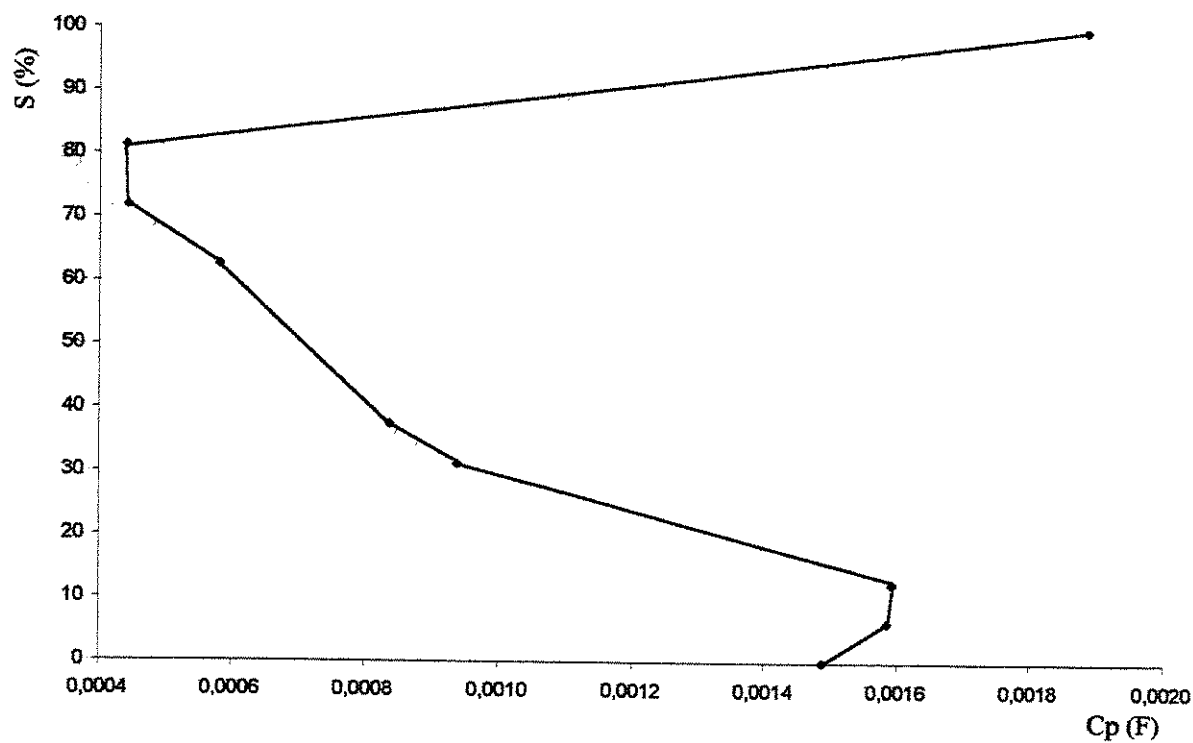


Fig. VII.19: Estado-de-carga pela capacitância em paralelo para $f = 10$ Hz.

4. Referências bibliográficas do Capítulo VII

[GOPIKANTH, 1979] "Impedance parameters and the state-of-charge. II. Lead-acid battery" Gopikanth M. L. e Sathyanarayana S., Journal of Applied Electrochemistry, vol. 9, pp 371, 1979.

[SATHYANARAYANA, 1979] "Impedance parameters and the state-of-charge. I. Nickel-cadmium battery" Sathyanarayana S, Venugopalan S., Gopikanth M. L., Journal of Applied Electrochemistry, vol. 9, pp 125, 1979

[SLUYTERS-REHBACH, 1971] Sluyters-Rehbach, M. e Sluyters, J. H., "Electro-analytical Chemistry", Ed. A. J. Bard, Vol. 8, (1971), pp. 157.

Capítulo VIII

Conclusões

1. Conclusões

Com base nos dados obtidos a partir dos ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica da bateria caracterizada no item 2 do Capítulo V, é possível chegar às seguintes conclusões:

1.1. Modelo utilizado para análise dos dados

Os dados obtidos experimentalmente apresentaram boa concordância com o circuito equivalente de Randles quando após acrescentadas as considerações relativas à porosidade da massa ativa dos eletrodos da bateria (item 2 do Capítulo VII).

1.2. Correlações entre os parâmetros eletroquímicos com o estado-de-carga

a) Módulo da impedância e resistências em série e paralelo:

A análise das correlações entre os parâmetros eletroquímicos com o estado-de-carga da bateria estudada, levou à conclusão de que os valores do módulo da impedância ($|Z|$), resistência em série (R_s) e resistência em paralelo (R_p) são influenciados pelas variações nos valores da resistência do eletrólito (R_Ω), a qual varia com o estado-de-carga, por ser dependente da concentração dos componentes iônicos do eletrólito. Devido à esse fato as correlações entre $|Z|$, R_s e R_p e o estado-de-carga foram descartadas como ferramentas de monitoração da quantidade de carga disponível na bateria.

b) Mudanças do ângulo de fase:

As correlações entre os ângulos de mudança da fase (ϕ) com o estado-de-carga apresentaram concordância polinomial de ordem múltipla, o que resulta em diferentes valores desse ângulo para uma mesma quantidade de carga na bateria (ver Figuras de VII.11 a VII.13). Este fato não permite a utilização de ϕ como parâmetro de monitoração do estado-de-carga.

c) Capacitância em paralelo:

Os valores obtidos para a capacitância em paralelo (C_p) não apresentaram boa correlação com o estado-de-carga, o que não permite a avaliação da quantidade de carga armazenada na bateria através desse parâmetro (ver Figuras de VII.17 a VII.19).

d) Capacitância em série:

Os valores obtidos para a capacitância em série (C_s) apresentaram boa correlação linear com o estado-de-carga (ver Figuras de VII.11 a VII.13), com valores, com valores de R^2 próximos da unidade. Esta linearidade é favorável à utilização de C_s como um parâmetro eletroquímico para o acompanhamento da quantidade de energia disponível na bateria.

Capítulo IX

Sugestões para estudos futuros

Uma vez que a correlação entre os valores de capacitância em série e os estados-de-carga da bateria apresentou-se com boa linearidade, torna-se oportuno sugerir estudos sobre o comportamento desta relação em baterias chumbo-ácidas de outras capacidades, modelos e fabricantes. Esta relação pode resultar em uma metodologia simples e de baixo custo para a estimativa do estado-de-carga desses acumuladores.

O fato da densidade do eletrólito das baterias chumbo-ácidas variar com o estado-de-carga impossibilitou a utilização do módulo da impedância e resistências em série e paralelo, como parâmetros de avaliação da quantidade de carga armazenada. Porém esses parâmetros podem ser úteis em baterias onde esse fato não ocorra.

ANEXO 1

GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

Acumulador: O mesmo que bateria.

autodescarga: Processo pelo qual a bateria perde energia acumulada devido às reações químicas espontâneas.

Barra coletora: Barra de interligação à qual são soldadas as placas de uma mesma polaridade e o(s) pólo(s) correspondente(s).

Bateria: Dispositivo eletroquímico que converte energia elétrica em energia química, armazenando-a para posterior restituição, em forma de energia elétrica, quando solicitada por um consumidor. Pode ser constituída por um elemento ou por uma associação de elementos.

Bateria chumbo-ácida: Acumulador na qual a matéria ativa é o chumbo e seus compostos, e o eletrólito é uma solução aquosa de ácido sulfúrico.

Bateria estacionária: Acumulador que opera em local fixo, destinado a fornecer energia elétrica em caso de falha no sistema de retificação ou do sistema de fornecimento convencional.

Bateria regulada por válvulas: Bateria com eletrólito imobilizado (absorvido ou gelificado) cujos gases produzidos durante sua operação são recombinados internamente, com o objetivo de tornar desprezível as emissões da bateria para o ambiente. É dotada de válvulas de segurança para evitar alta pressão interna, em casos de sobrecarga ou outros eventos que levem à produção excessiva de gases. Este tipo de bateria também é conhecido como bateria selada.

Bateria ventilada: Bateria com eletrólito não imobilizado e cujos gases produzidos durante sua operação são exalados para o ambiente. Normalmente os gases exalados arrastam gotículas de eletrólito.

Capacidade de uma bateria: É a quantidade de energia elétrica que a bateria é capaz de fornecer até o seu instante final de descarga, quando submetida à determinado regime de

descarga. Normalmente a capacidade de um acumulador é medida em ampère-hora (Ah) e referenciada à temperatura de referência.

Capacidade nominal: Capacidade de armazenamento de uma bateria em Ah, definida para uma operação de descarga com corrente constante, durante um período pré determinado, até a tensão final de descarga. O valor da capacidade nominal é referenciado à temperatura de referência.

Carga com corrente constante: Operação de carga de uma bateria, mantendo-se constante a corrente elétrica fornecida.

Carga com tensão constante: Operação de carga de uma bateria, mantendo-se constante a diferença de potencial na fonte de corrente contínua.

Carga de equalização: Operação de carga, realizada após o estado de plena carga, pela qual é forçada a equalização de tensão e densidade de todos os elementos de uma bateria.

Carga de flutuação: Operação de carga, realizada após o estado de plena carga, pela qual são compensadas as perdas por autodescarga de um acumulador.

Carga de uma bateria: Operação pela qual se fornece energia elétrica ao acumulador, para que seja armazenada na forma de energia química.

Célula eletroquímica: O mesmo que bateria.

Corrente de carga: Valor da corrente elétrica fornecida ao acumulador quando o mesmo está em carga.

Corrente de descarga: Valor da corrente elétrica fornecida pelo acumulador durante a operação de descarga.

Densidade a plena carga: Densidade do eletrólito no instante final de carga e à temperatura de referência.

Densidade final de descarga: Densidade do eletrólito no instante final de descarga, à temperatura de referência.

Densidade nominal: Densidade do eletrólito de um elemento plenamente carregado, à temperatura de referência e com o nível de eletrólito na indicação de máximo do vaso da bateria.

Descarga de uma bateria: Operação pela qual a energia química armazenada na bateria é consumida em forma de energia elétrica.

Elemento: Unidade elementar de uma bateria. É constituído de placas com polaridades elétricas opostas e banhadas por um mesmo eletrólito. Normalmente as placas são eletricamente isoladas entre si por meio de separadores permeáveis ao eletrólito.

Estratificação do eletrólito: Formação de regiões ou camadas de diferentes densidades no eletrólito, quando a bateria é submetida a prolongados períodos de repouso.

Gaseificação: Fenômeno de formação de gases devido aos processos químicos de operação da bateria. Em uma bateria chumbo-ácida é o processo de decomposição da água do eletrólito, acarretando na formação dos gases hidrogênio e oxigênio.

Grade: Estrutura metálica destinada a conduzir a corrente elétrica e suportar a massa ativa das placas. Normalmente, nas baterias chumbo-ácidas, a grade é constituída por uma liga de chumbo ou de chumbo de alta pureza.

Grupo: Placa ou conjunto de placas de uma mesma polaridade, interligadas, que pertencem a um mesmo elemento.

Instante final de carga: Momento a partir do qual não ocorrem mais acréscimos na diferença de potencial elétrico entre os pólos de polaridades diferentes e na densidade do eletrólito de uma bateria, estando a mesma submetida à uma carga com corrente constante e não submetida a flutuações de temperatura. Por convenção, o instante final de carga é determinado após três leituras iguais e consecutivas de diferença de potencial elétrico, efetuadas com intervalo de 1 h entre leituras.

Instante final de descarga: Momento no qual a bateria atinge a tensão final de descarga.

Massa ativa: Parte das placas que sofre transformação química durante a passagem de corrente elétrica.

Matéria ativa: O mesmo que massa ativa.

Placa: Componente da bateria constituído pela grade e a massa ativa.

Placa negativa: Placa ou grupo de placas que tem o potencial elétrico menos elevado, durante a operação normal da bateria.

Placa positiva: Placa ou grupo de placas que tem o potencial elétrico mais elevado, durante a operação normal da bateria.

Plena carga: Estado que o acumulador atinge no instante final de carga.

Pólo: Peça metálica de uma bateria que é emergente da barra coletora e que permite a conexão elétrica com o circuito externo.

Sedimentação: Processo de deposição gradativa de resíduos que se desprendem das placas de um acumulador.

Separador: Componente da bateria constituído de material isolante e permeável ao eletrólito, que separa as placas de polaridades opostas.

Sobrecarga: Prolongamento da operação de carga, além do instante final de carga.

Temperatura de referência: Temperatura de 25° C.

Temperatura do elemento: Temperatura de seu eletrólito.

Temperatura média de descarga: Média dos valores de temperatura medidos durante a operação de descarga.

Tempo de carga: Período necessário para a bateria atingir o instante final de carga.

Tensão à plena carga: Diferença de potencial elétrico entre as placas de sinais opostos de uma bateria, no instante final de carga.

Tensão de gaseificação: Diferença de potencial elétrico, medido entre as placas de sinais opostos de uma bateria, acima da qual inicia-se o desprendimento intenso de gases, devido à decomposição da água. Para baterias chumbo-ácidas novas, a tensão de gaseificação é de $2,40 \pm 0,05$ V por elemento, na temperatura de referência.

Tensão em circuito aberto: Valor da diferença de potencial elétrico entre as placas de sinais opostos de uma bateria, quando o acumulador está desconectado do circuito elétrico externo.

Tensão final de descarga: Diferença de potencial elétrico entre as placas de sinais opostos de uma bateria, à abaixo da qual se considera a bateria tecnicamente descarregada, para um

determinado regime de descarga. Para uma bateria chumbo-ácida, a tensão final de descarga é de 1,75 V por elemento, à temperatura de referência.

Tensão nominal: Valor da diferença de potencial elétrico entre as placas de sinais opostos de uma bateria, adotado para caracterizar o tipo de acumulador. Para uma bateria chumbo-ácida a tensão nominal é de 2 V por elemento, à temperatura de referência.

Terminal: O mesmo que pólo.

Válvula: Dispositivo de segurança, destinado a evitar alta pressão no interior de baterias reguladas por válvulas, devido à produção de gases além da capacidade de recombinação do acumulador, o que pode provocar a explosão do vaso. Também possui a propriedade de dificultar a saída de gotículas de eletrólito, que podem ser arrastadas durante o processo de carga do acumulador, e impedir a entrada de impurezas no mesmo.

Vaso: É o recipiente que contém os componentes da bateria.

Vida útil de uma bateria: Intervalo de tempo entre o início de operação da bateria e o instante no qual a sua capacidade de armazenamento atinge 80 % da capacidade nominal.

ANEXO 2

DADOS OBTIDOS

Tabela 1: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 100\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-02		6,620E-02	2,618E-01	0,2	0,1		3	0,9	2	1
1,585E-02	7,511E-02	6,554E-02	2,936E-01	0,1	0,1	1,5	2,1	0,5	1,4	0,8
2,512E-02	7,464E-02	6,485E-02	2,836E-01	0,1	0,1	1,2	1,6	0,5	1,1	0,6
3,981E-02	7,456E-02	6,443E-02	2,573E-01	0,1	0,1	1,2	1,2	0,2	0,9	0,6
6,310E-02	7,461E-02	6,444E-02	2,573E-01	0,1	0,1	0,7	1,1	-0,1	0,6	0,6
1,000E-01	7,417E-02	6,408E-02	2,551E-01	0,1	0,1	0,7	0,8	0,3	0,6	0,3
1,585E-01	7,385E-02	6,399E-02	2,471E-01	0,1	0,1	0,4	0,5	0,2	0,4	0,2
2,512E-01	7,392E-02	6,396E-02	2,423E-01	0,1	0,1	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3
3,981E-01	7,362E-02	6,372E-02	2,352E-01	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2
6,310E-01	7,362E-02	6,372E-02	2,338E-01	0,1	0,1	0,3	0,3	0	0,2	0,2
1,000E+00	7,353E-02	6,360E-02	2,367E-01	0,1	0,1	0,2	0,3	0	0,2	0,2
1,585E+00	7,343E-02	6,338E-02	2,397E-01	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,1	0,1
2,512E+00	7,336E-02	6,331E-02	2,397E-01	0,1	0,1	0,2	0,3	0	0,2	0,2
3,981E+00	7,322E-02	6,330E-02	2,420E-01	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,1	0,1
6,310E+00	7,313E-02	6,316E-02	2,460E-01	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,1	0,1
1,000E+01	7,303E-02	6,307E-02	2,471E-01	0,1	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1
1,585E+01	7,293E-02	6,296E-02	2,400E-01	0,1	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1
2,512E+01	7,282E-02	6,287E-02	2,377E-01	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1
3,981E+01	7,268E-02	6,275E-02	2,320E-01	0,1	0,1	0	0	-0,1	0,0	0,1
6,310E+01	7,261E-02	6,264E-02	2,299E-01	0,1	0,1	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	0,1
1,000E+02	7,245E-02	6,251E-02	2,328E-01	0,1	0,1	-0,5	-0,5	-0,2	-0,4	0,2
1,585E+02	7,234E-02	6,240E-02	2,397E-01	0,1	0,1	-1	-1	-0,3	-0,8	0,4
2,512E+02	7,227E-02	6,233E-02	2,444E-01	0,1	0,1	-1,7	-1,7	-0,6	-1,3	0,6
3,981E+02	7,234E-02	6,235E-02	2,478E-01	0,1	0,1	-2,9	-2,9	-1	-2	1
6,310E+02	7,245E-02	6,238E-02	2,464E-01	0,1	0,1	-4,6	-4,8	-1,5	-4	2
1,000E+03	7,308E-02	6,289E-02	2,464E-01	0,1	0,1	-7,3	-7,6	-2,4	-6	3
1,585E+03	7,404E-02	6,371E-02	2,466E-01	0,1	0,1	-11,5	-12,1	-3,7	-9	5
2,512E+03	7,626E-02	6,568E-02	2,471E-01	0,1	0,1	-17,7	-18,7	-5,7	-14	7
3,981E+03	8,120E-02	7,029E-02	2,451E-01	0,1	0,1	-26,6	-28,2	-9,2	-21	11
6,310E+03	9,203E-02	8,066E-02	2,443E-01	0,14	0,09	-38,4	-40,8	-14,7	-31	14
1,000E+04	1,144E-01	1,026E-01	2,530E-01	0,16	0,08	-52,3	-55	-22,7	-43	18
1,585E+04	1,593E-01	1,460E-01	2,955E-01	0,20	0,08	-65,6	-68,2	-32	-55	20
2,512E+04	2,426E-01	2,259E-01	3,547E-01	0,27	0,07	-75,9	-77,9	-45,5	-66	18
3,981E+04	3,850E-01	3,619E-01	4,733E-01	0,41	0,06	-82,3	-83,7	-59,7	-75	13
6,310E+04	6,142E-01	5,794E-01	6,918E-01	0,63	0,06	-86,1	-87,1	-71,2	-81	9
1,000E+05	9,748E-01	9,224E-01	1,061E+00	0,99	0,07	-88,8	-89,4	-79,1	-86	6
1,585E+05	1,536E+00	1,458E+00	1,649E+00	1,5	0,1	-91,4	-91,9	-85,3	-90	4
2,512E+05	2,425E+00	2,302E+00	2,586E+00	2,4	0,1	-94,2	-94,5	-89,9	-93	3
3,981E+05	3,462E+00	3,175E+00	3,526E+00	3,4	0,2	-100,8	-100,5	-98,1	-100	1
6,310E+05	2,303E+01	2,785E+01	8,458E+00	20	10	-116,9	-114,3	-122,3	-118	4
1,000E+06	7,229E-02	6,290E-02	2,553E-01	0,1	0,1	-0,4	-0,4	-0,1	-0,3	0,2

Tabela 2: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 90,63\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-01	4,494E-02	4,199E-02	4,409E-02	0,044	0,002	1,4	1,7	1	1,4	0,4
1,585E-01	4,452E-02	4,169E-02	4,384E-02	0,043	0,001	0,8	0,8	1,1	0,9	0,2
2,512E-01	4,498E-02	4,206E-02	4,338E-02	0,043	0,001	0,9	0,9	0,3	0,7	0,3
3,981E-01	4,474E-02	4,171E-02	4,339E-02	0,043	0,002	0,6	0,5	0,6	0,6	0,1
6,310E-01	4,445E-02	4,160E-02	4,323E-02	0,043	0,001	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1
1,000E+00	4,444E-02	4,143E-02	4,326E-02	0,043	0,002	0,2	0,4	0,1	0,2	0,2
1,585E+00	4,453E-02	4,152E-02	4,310E-02	0,043	0,002	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1
2,512E+00	4,433E-02	4,129E-02	4,308E-02	0,043	0,002	-0,4	0	0,3	0,0	0,4
3,981E+00	4,421E-02	4,124E-02	4,294E-02	0,043	0,001	0	0	0,2	0,1	0,1
6,310E+00	4,416E-02	4,116E-02	4,298E-02	0,043	0,002	0	-0,1	0	0,0	0,1
1,000E+01	4,411E-02	4,113E-02	4,295E-02	0,043	0,002	0,3	-0,4	-0,1	-0,1	0,4
1,585E+01	4,409E-02	4,112E-02	4,287E-02	0,043	0,001	-0,1	0	0,5	0,1	0,3
2,512E+01	4,411E-02	4,117E-02	4,294E-02	0,043	0,001	0,1	0,2	-0,1	0,1	0,2
3,981E+01	4,409E-02	4,108E-02	4,288E-02	0,043	0,002	-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	0,1
6,310E+01	4,401E-02	4,105E-02	4,282E-02	0,043	0,001	-0,2	0,3	-0,4	-0,1	0,4
1,000E+02	4,406E-02	4,107E-02	4,288E-02	0,043	0,002	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	0,1
1,585E+02	4,399E-02	4,104E-02	4,279E-02	0,043	0,001	-0,9	-0,8	-1	-0,9	0,1
2,512E+02	4,400E-02	4,116E-02	4,302E-02	0,043	0,001	-2	-1,1	-1	-1,4	0,6
3,981E+02	4,395E-02	4,101E-02	4,287E-02	0,043	0,001	-3	-3,7	-3,5	-3,4	0,4
6,310E+02	4,400E-02	4,104E-02	4,300E-02	0,043	0,002	-4,9	-5,6	-5,4	-5,3	0,4
1,000E+03	4,431E-02	4,145E-02	4,334E-02	0,043	0,001	-8,1	-9,7	-8,5	-8,8	0,8
1,585E+03	4,527E-02	4,252E-02	4,444E-02	0,044	0,001	-12,7	-14,7	-13,2	-14	1
2,512E+03	4,646E-02	4,479E-02	4,632E-02	0,046	0,001	-19	-23,2	-20,7	-21	2
3,981E+03	5,032E-02	4,896E-02	4,975E-02	0,050	0,001	-29,1	-33,4	-30,1	-31	2
6,310E+03	5,856E-02	5,830E-02	5,859E-02	0,0585	0,0002	-42	-46	-43	-44	2
1,000E+04	7,435E-02	7,811E-02	7,457E-02	0,076	0,002	-55,5	-60,1	-56,3	-57	2
1,585E+04	1,060E-01	1,159E-01	1,078E-01	0,110	0,005	-68,2	-71,6	-69	-70	2
2,512E+04	1,656E-01	1,821E-01	1,680E-01	0,172	0,009	-78,5	-80,4	-78,9	-79	1
3,981E+04	2,676E-01	2,954E-01	2,677E-01	0,28	0,02	-84,6	-87,2	-85,5	-86	1
6,310E+04	4,334E-01	4,779E-01	4,363E-01	0,45	0,02	-88,6	-89	-88,6	-88,7	0,2
1,000E+05	6,950E-01	7,600E-01	7,014E-01	0,72	0,04	-90,4	-90,7	-90,4	-90,5	0,2
1,585E+05	1,099E+00	1,202E+00	1,109E+00	1,14	0,06	-90,6	-92,7	-90,5	-91	1
2,512E+05	1,738E+00	1,902E+00	1,754E+00	1,86	0,09	-95,3	-95,4	-95,3	-95,3	0,1
3,981E+05	2,515E+00	2,749E+00	2,538E+00	2,6	0,1	-101,2	-101	-101,1	-101,1	0,1
6,310E+05	1,391E+01	1,655E+01	1,414E+01	15	1	-127,1	-130,5	-127,6	-128	2
1,000E+06	4,432E-02	4,118E-02	4,325E-02	0,043	0,002	-0,2	-0,4	0,1	-0,2	0,3

Tabela 3: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 81,25\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	medio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-01	6,213E-02	6,553E-02	6,344E-02	0,064	0,002	0,7	0,7	0,6	0,7	0,1
1,585E-01	6,219E-02	6,549E-02	6,330E-02	0,064	0,002	0,6	0,5	0,5	0,5	0,1
2,512E-01	6,220E-02	6,538E-02	6,334E-02	0,064	0,002	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0
3,981E-01	6,199E-02	6,526E-02	6,317E-02	0,063	0,002	0,3	0,4	0,3	0,3	0,1
6,310E-01	6,187E-02	6,522E-02	6,299E-02	0,063	0,002	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
1,000E+00	6,177E-02	6,507E-02	6,298E-02	0,063	0,002	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
1,585E+00	6,176E-02	6,503E-02	6,291E-02	0,063	0,002	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
2,512E+00	6,166E-02	6,491E-02	6,279E-02	0,063	0,002	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
3,981E+00	6,100E-02	6,485E-02	6,269E-02	0,063	0,002	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
6,310E+00	6,150E-02	6,479E-02	6,263E-02	0,063	0,002	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
1,000E+01	6,140E-02	6,472E-02	6,256E-02	0,063	0,002	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
1,585E+01	6,132E-02	6,463E-02	6,245E-02	0,063	0,002	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
2,512E+01	6,122E-02	6,456E-02	6,237E-02	0,063	0,002	0,1	0,1	0	0,1	0,1
3,981E+01	6,110E-02	6,443E-02	6,227E-02	0,063	0,002	-0,1	0	-0,1	-0,1	0,1
6,310E+01	6,098E-02	6,434E-02	6,219E-02	0,063	0,002	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	0,1
1,000E+02	6,086E-02	6,419E-02	6,203E-02	0,062	0,002	-0,5	-0,4	-0,6	-0,5	0,1
1,585E+02	6,075E-02	6,407E-02	6,194E-02	0,062	0,002	-1	-0,8	-1,2	-1,0	0,2
2,512E+02	6,067E-02	6,398E-02	6,188E-02	0,062	0,002	-1,8	-1,5	-2,1	-1,8	0,3
3,981E+02	6,070E-02	6,401E-02	6,199E-02	0,062	0,002	-3,1	-2,7	-3,5	-3,1	0,4
6,310E+02	6,075E-02	6,400E-02	6,214E-02	0,062	0,002	-5,1	-4,3	-5,6	-5,0	0,7
1,000E+03	6,131E-02	6,456E-02	6,289E-02	0,063	0,002	-8,1	-6,9	-8,8	-8	1
1,585E+03	6,222E-02	6,530E-02	6,406E-02	0,064	0,002	-12,7	-10,9	-13,7	-12	1
2,512E+03	6,439E-02	6,698E-02	6,671E-02	0,066	0,001	-19,6	-17	-21	-19	2
3,981E+03	6,940E-02	7,082E-02	7,261E-02	0,071	0,002	-29,5	-25,9	-31,1	-29	3
6,310E+03	8,048E-02	7,962E-02	8,536E-02	0,082	0,003	-42,2	-37,9	-43,9	-41	3
1,000E+04	1,036E-01	9,885E-02	1,112E-01	0,105	0,006	-56,3	-52,1	-57,6	-55	3
1,585E+04	1,485E-01	1,378E-01	1,605E-01	0,15	0,01	-69	-65,9	-69,8	-68	2
2,512E+04	2,302E-01	2,112E-01	2,488E-01	0,23	0,02	-78,4	-76,5	-78,7	-78	1
3,981E+04	3,684E-01	3,377E-01	3,972E-01	0,37	0,03	-84	-82,9	-84,1	-83,7	0,7
6,310E+04	5,902E-01	5,410E-01	6,353E-01	0,59	0,05	-87,2	-86,6	-87,2	-87,0	0,3
1,000E+05	9,397E-01	8,607E-01	1,011E+00	0,94	0,08	-89,5	-89,1	-89,5	-89,4	0,2
1,585E+05	1,488E+00	1,361E+00	1,598E+00	1,5	0,1	-91,8	-91,6	-91,9	-91,8	0,2
2,512E+05	2,360E+00	2,157E+00	2,536E+00	2,4	0,2	-94,5	-94,4	-94,6	-94,5	0,1
3,981E+05	3,186E+00	2,992E+00	3,523E+00	3,2	0,3	-98,2	-98,1	-98,1	-98,1	0,1
6,310E+05	3,198E+01	2,413E+01	8,507E+00	22	12	-118,7	-116,1	-123,1	-119	4
1,000E+06	6,085E-02	6,405E-02	6,209E-02	0,062	0,002	-0,4	-0,4	-0,5	-0,4	0,1

Tabela 4: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 71,88\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	medio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-01	6,501E-02	6,085E-02	6,512E-02	0,084	0,002	0,6	0,8	0,8	0,7	0,1
1,585E-01	6,486E-02	6,027E-02	6,507E-02	0,063	0,003	0,4	0,6	0,4	0,5	0,1
2,512E-01	6,478E-02	6,036E-02	6,509E-02	0,063	0,003	0,5	0,5	0,4	0,5	0,1
3,981E-01	6,461E-02	6,019E-02	6,477E-02	0,063	0,003	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
6,310E-01	6,456E-02	6,009E-02	6,477E-02	0,063	0,003	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
1,000E+00	6,442E-02	5,998E-02	6,468E-02	0,063	0,003	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
1,585E+00	6,440E-02	5,989E-02	6,455E-02	0,063	0,003	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
2,512E+00	6,431E-02	5,983E-02	6,452E-02	0,063	0,003	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
3,981E+00	6,419E-02	5,974E-02	6,445E-02	0,063	0,003	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
6,310E+00	6,415E-02	5,968E-02	6,437E-02	0,063	0,003	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
1,000E+01	6,405E-02	5,963E-02	6,428E-02	0,063	0,003	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
1,585E+01	6,395E-02	5,951E-02	6,419E-02	0,063	0,003	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
2,512E+01	6,385E-02	5,942E-02	6,411E-02	0,062	0,003	0	0	0	0,0	0,0
3,981E+01	6,375E-02	5,931E-02	6,400E-02	0,062	0,003	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0
6,310E+01	6,367E-02	5,921E-02	6,390E-02	0,062	0,003	-0,3	-0,3	-0,4	-0,3	0,1
1,000E+02	6,357E-02	5,909E-02	6,379E-02	0,062	0,003	-0,7	-0,6	-0,7	-0,7	0,1
1,585E+02	6,351E-02	5,899E-02	6,370E-02	0,062	0,003	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	0,0
2,512E+02	6,348E-02	5,891E-02	6,366E-02	0,062	0,003	-2	-2,1	-2,1	-2,1	0,1
3,981E+02	6,352E-02	5,896E-02	6,374E-02	0,062	0,003	-3,3	-3,5	-3,5	-3,4	0,1
6,310E+02	6,370E-02	5,905E-02	6,399E-02	0,062	0,003	-5,3	-5,6	-5,6	-5,5	0,2
1,000E+03	6,414E-02	5,967E-02	6,458E-02	0,063	0,003	-8,2	-9	-8,7	-8,6	0,4
1,585E+03	6,523E-02	6,077E-02	6,576E-02	0,064	0,003	-12,9	-14	-13,6	-13,5	0,6
2,512E+03	6,757E-02	6,330E-02	6,841E-02	0,066	0,003	-19,7	-21,6	-20,7	-21	1
3,981E+03	7,289E-02	6,916E-02	7,433E-02	0,072	0,003	-29,4	-32,2	-30,8	-31	1
6,310E+03	8,465E-02	8,202E-02	8,717E-02	0,085	0,003	-42	-45,3	-43,5	-44	2
1,000E+04	1,086E-01	1,083E-01	1,133E-01	0,110	0,003	-55,8	-59,2	-57,3	-57	2
1,585E+04	1,549E-01	1,580E-01	1,632E-01	0,159	0,004	-68,5	-71,2	-69,5	-70	1
2,512E+04	2,393E-01	2,470E-01	2,529E-01	0,246	0,007	-77,9	-79,8	-78,5	-79	1
3,981E+04	3,817E-01	3,961E-01	4,036E-01	0,39	0,01	-83,6	-84,9	-83,9	-84,1	0,7
6,310E+04	6,098E-01	6,347E-01	6,450E-01	0,63	0,02	-86,9	-87,7	-87,1	-87,2	0,4
1,000E+05	9,690E-01	1,011E+00	1,025E+00	1,00	0,03	-89,2	-89,8	-89,4	-89,5	0,3
1,585E+05	1,530E+00	1,598E+00	1,620E+00	1,58	0,05	-91,6	-92,1	-91,8	-91,8	0,3
2,512E+05	2,430E+00	2,533E+00	2,569E+00	2,51	0,07	-94,3	-94,6	-94,4	-94,4	0,2
3,981E+05	3,277E+00	3,464E+00	3,458E+00	3,4	0,1	-97,4	-99,1	-97,9	-98,1	0,9
6,310E+05	3,698E+01	8,500E+00	8,632E+00	18	16	-130,4	-122,6	-122,1	-125	5
1,000E+06	6,361E-02	5,919E-02	6,370E-02	0,062	0,003	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,0

Tabela 5: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 62,50\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	medio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-02		6,447E-02	6,788E-02	0,066	0,002		2,9	3	3,0	0,1
1,585E-02		6,496E-02	6,778E-02	0,066	0,002		2,1	2,2	2,2	0,1
2,512E-02		6,480E-02	6,768E-02	0,066	0,002		1,3	1,3	1,3	0,0
3,981E-02		6,440E-02	6,749E-02	0,066	0,002		1,1	1	1,1	0,1
6,310E-02		6,462E-02	6,752E-02	0,066	0,002		1	1	1,0	0,0
1,000E-01	6,226E-02	6,389E-02	6,759E-02	0,065	0,003	0,8	0,6	0,6	0,7	0,1
1,585E-01	6,215E-02	6,351E-02	6,757E-02	0,064	0,003	0,6	0,5	0,6	0,6	0,1
2,512E-01	6,211E-02	6,394E-02	6,743E-02	0,064	0,003	0,5	0,6	0,5	0,5	0,1
3,981E-01	6,193E-02	6,374E-02	6,745E-02	0,064	0,003	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
6,310E-01	6,178E-02	6,336E-02	6,751E-02	0,064	0,003	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1
1,000E+00	6,167E-02	6,311E-02	6,736E-02	0,064	0,003	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
1,585E+00	6,160E-02	6,282E-02	6,729E-02	0,064	0,003	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1
2,512E+00	6,151E-02	6,288E-02	6,729E-02	0,064	0,003	0,2	0	0,2	0,1	0,1
3,981E+00	6,139E-02	6,275E-02	6,738E-02	0,064	0,003	0,2	0	0,1	0,1	0,1
6,310E+00	6,131E-02	6,275E-02	6,732E-02	0,064	0,003	0,2	-0,3	0,2	0,0	0,3
1,000E+01	6,120E-02	6,261E-02	6,731E-02	0,064	0,003	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
1,585E+01	6,109E-02	6,276E-02	6,721E-02	0,064	0,003	0,2	-0,1	0,1	0,1	0,2
2,512E+01	6,099E-02	6,286E-02	6,725E-02	0,064	0,003	0,1	0	0,1	0,1	0,1
3,981E+01	6,088E-02	6,273E-02	6,719E-02	0,064	0,003	0	-0,2	-0,1	-0,1	0,1
6,310E+01	6,081E-02	6,273E-02	6,713E-02	0,064	0,003	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	0,1
1,000E+02	6,067E-02	6,276E-02	6,720E-02	0,064	0,003	-0,5	-0,3	-0,5	-0,4	0,1
1,585E+02	6,059E-02	6,269E-02	6,722E-02	0,064	0,003	-0,9	-0,4	-1	-0,8	0,3
2,512E+02	6,054E-02	6,270E-02	6,737E-02	0,064	0,003	-1,6	-0,8	-1,7	-1,4	0,5
3,981E+02	6,056E-02	6,263E-02	6,758E-02	0,064	0,004	-2,8	-2,3	-2,9	-2,7	0,3
6,310E+02	6,063E-02	6,262E-02	6,776E-02	0,064	0,004	-4,5	-3,9	-4,6	-4,3	0,4
1,000E+03	6,099E-02	6,270E-02	6,845E-02	0,064	0,004	-7,1	-6,8	-7,1	-7,0	0,2
1,585E+03	6,171E-02	6,375E-02	6,937E-02	0,065	0,004	-11,1	-11,1	-11,1	-11,1	0,0
2,512E+03	6,339E-02	6,600E-02	7,041E-02	0,067	0,004	-17,3	-17,6	-17,2	-17,4	0,2
3,981E+03	6,724E-02	6,942E-02	7,482E-02	0,070	0,004	-26,2	-26,1	-25,9	-26,1	0,2
6,310E+03	7,577E-02	7,773E-02	8,427E-02	0,079	0,004	-38,2	-37,6	-37,5	-37,8	0,4
1,000E+04	9,417E-02	9,762E-02	1,041E-01	0,089	0,005	-52,3	-52,1	-51,3	-51,9	0,5
1,585E+04	1,315E-01	1,368E-01	1,439E-01	0,137	0,006	-66,1	-65,2	-64,9	-65,4	0,6
2,512E+04	2,018E-01	2,085E-01	2,174E-01	0,210	0,008	-76,7	-75,9	-76,3	-76,3	0,4
3,981E+04	3,226E-01	3,354E-01	3,458E-01	0,33	0,01	-83,1	-82,4	-82,7	-82,7	0,4
6,310E+04	5,171E-01	5,406E-01	5,521E-01	0,54	0,02	-86,7	-87	-86,3	-86,7	0,4
1,000E+05	8,228E-01	8,570E-01	8,771E-01	0,85	0,03	-89,1	-89,2	-88,8	-89,0	0,2
1,585E+05	1,300E+00	1,352E+00	1,383E+00	1,35	0,04	-91,6	-91,7	-91,4	-91,6	0,2
2,512E+05	2,053E+00	2,135E+00	2,183E+00	2,12	0,07	-94,4	-94,6	-94,2	-94,4	0,2
3,981E+05	2,931E+00	3,081E+00	3,094E+00	3,04	0,09	-99,4	-100,1	-99,4	-99,6	0,4
6,310E+05	2,007E+01	2,156E+01	2,398E+01	22	2	-131,5	-135,7	-129,2	-132	3
1,000E+06	6,070E-02	6,279E-02	6,431E-02	0,063	0,002	-0,4	0,1	-0,4	-0,2	0,3

Tabela 6: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 53,13\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-02	7,763E-02	7,125E-02	1,564E-01	0,10	0,05	2,0	2,7	1,3	2,0	0,7
1,585E-02	7,667E-02	7,064E-02	1,537E-01	0,10	0,05	1,5	1,7	1,0	1,4	0,4
2,512E-02	7,612E-02	2,512E-02	1,559E-01	0,09	0,07	1,3	1,4	0,6	1,1	0,4
3,981E-02	7,654E-02	6,946E-02	1,621E-01	0,10	0,05	0,9	1,1	0,5	0,8	0,3
6,310E-02	7,580E-02	6,310E-02	1,616E-01	0,10	0,05	0,7	0,9	0,3	0,6	0,3
1,000E-01	7,569E-02	6,909E-02	1,610E-01	0,10	0,05	0,5	0,6	0,2	0,4	0,2
1,585E-01	7,560E-02	6,894E-02	1,608E-01	0,10	0,05	0,5	0,5	0,2	0,4	0,2
2,512E-01	7,547E-02	6,889E-02	1,601E-01	0,10	0,05	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
3,981E-01	7,534E-02	6,878E-02	1,614E-01	0,10	0,05	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2
6,310E-01	7,528E-02	6,860E-02	1,615E-01	0,10	0,05	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1
1,000E+00	7,523E-02	6,842E-02	1,587E-01	0,10	0,05	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1
1,585E+00	7,510E-02	6,842E-02	1,583E-01	0,10	0,05	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
2,512E+00	7,509E-02	6,827E-02	1,600E-01	0,10	0,05	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
3,981E+00	7,491E-02	6,814E-02	1,620E-01	0,10	0,05	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1
6,310E+00	7,484E-02	6,804E-02	1,640E-01	0,10	0,05	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1
1,000E+01	7,474E-02	6,794E-02	1,651E-01	0,10	0,05	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1
1,585E+01	7,464E-02	6,783E-02	1,659E-01	0,10	0,05	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
2,512E+01	7,452E-02	6,774E-02	1,697E-01	0,10	0,06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,981E+01	7,442E-02	6,759E-02	1,698E-01	0,10	0,06	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,1
6,310E+01	7,431E-02	6,748E-02	1,693E-01	0,10	0,06	-0,3	-0,3	-0,1	-0,2	0,1
1,000E+02	7,423E-02	6,736E-02	1,714E-01	0,10	0,06	-0,6	-0,6	-0,2	-0,5	0,2
1,585E+02	7,415E-02	6,727E-02	1,723E-01	0,10	0,06	-1,0	-1,1	-0,4	-0,8	0,4
2,512E+02	7,413E-02	6,715E-02	1,704E-01	0,10	0,06	-1,8	-1,9	-0,7	-1,5	0,7
3,981E+02	7,418E-02	6,718E-02	1,701E-01	0,10	0,06	-2,9	-3,2	-1,2	-2	1
6,310E+02	7,436E-02	6,731E-02	1,708E-01	0,10	0,06	-4,6	-5,2	-1,9	-4	2
1,000E+03	7,479E-02	6,783E-02	1,678E-01	0,10	0,06	-7,2	-8,3	-3,1	-6	3
1,585E+03	7,579E-02	6,891E-02	1,681E-01	0,10	0,06	-11,3	-13,0	-4,9	-10	4
2,512E+03	7,801E-02	7,139E-02	1,701E-01	0,11	0,06	-17,4	-20,0	-7,6	-15	7
3,981E+03	8,292E-02	7,724E-02	1,733E-01	0,11	0,05	-26,2	-30,0	-11,8	-23	10
6,310E+03	9,369E-02	9,000E-02	1,800E-01	0,12	0,05	-37,9	-42,7	-18,2	-33	13
1,000E+04	1,163E-01	1,163E-01	1,972E-01	0,14	0,05	-51,6	-56,6	-26,9	-45	16
1,585E+04	1,611E-01	1,670E-01	2,241E-01	0,18	0,03	-64,9	-69,1	-39,7	-58	16
2,512E+04	2,444E-01	2,583E-01	2,647E-01	0,26	0,02	-75,2	-78,2	-54,8	-69	13
3,981E+04	3,864E-01	4,119E-01	4,108E-01	0,40	0,01	-81,7	-83,7	-66,9	-77	9
6,310E+04	6,149E-01	6,581E-01	6,255E-01	0,63	0,02	-85,6	-87,0	-76,2	-83	6
1,000E+05	9,742E-01	1,047E+00	9,779E-01	1,00	0,04	-88,4	-89,4	-82,1	-87	4
1,585E+05	1,535E+00	1,653E+00	1,532E+00	1,6	0,1	-91,1	-91,8	-86,9	-90	3
2,512E+05	2,423E+00	2,605E+00	2,411E+00	2,5	0,1	-93,9	-94,4	-91,2	-93	2
3,981E+05	3,334E+00	3,552E+00	3,319E+00	3,4	0,1	-99,0	-101,8	-98,2	-100	2
6,310E+05	8,028E+00	8,566E+00	3,199E+01	16	14	-123,5	-123,7	-109,4	-119	8
1,000E+06	7,446E-02	6,683E-02	2,674E-01	0,1	0,1	-0,4	-0,4	0,0	-0,3	0,2

Tabela 7: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 43,75\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	medio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-02		6,620E-02	2,618E-01	0,2	0,1		3	0,9	2	1
1,585E-02	7,511E-02	6,554E-02	2,936E-01	0,1	0,1	1,5	2,1	0,5	1,4	0,8
2,512E-02	7,464E-02	6,485E-02	2,836E-01	0,1	0,1	1,2	1,6	0,5	1,1	0,6
3,981E-02	7,456E-02	6,443E-02	2,573E-01	0,1	0,1	1,2	1,2	0,2	0,9	0,6
6,310E-02	7,461E-02	6,444E-02	2,573E-01	0,1	0,1	0,7	1,1	-0,1	0,6	0,6
1,000E-01	7,417E-02	6,408E-02	2,551E-01	0,1	0,1	0,7	0,8	0,3	0,6	0,3
1,585E-01	7,385E-02	6,399E-02	2,471E-01	0,1	0,1	0,4	0,5	0,2	0,4	0,2
2,512E-01	7,392E-02	6,396E-02	2,423E-01	0,1	0,1	0,5	0,6	0,1	0,4	0,3
3,981E-01	7,362E-02	6,372E-02	2,352E-01	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1	0,3	0,2
6,310E-01	7,362E-02	6,372E-02	2,338E-01	0,1	0,1	0,3	0,3	0	0,2	0,2
1,000E+00	7,353E-02	6,360E-02	2,367E-01	0,1	0,1	0,2	0,3	0	0,2	0,2
1,585E+00	7,343E-02	6,338E-02	2,397E-01	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,1	0,1
2,512E+00	7,336E-02	6,331E-02	2,397E-01	0,1	0,1	0,2	0,3	0	0,2	0,2
3,981E+00	7,322E-02	6,330E-02	2,420E-01	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,1	0,1
6,310E+00	7,313E-02	6,316E-02	2,460E-01	0,1	0,1	0,2	0,2	0	0,1	0,1
1,000E+01	7,303E-02	6,307E-02	2,471E-01	0,1	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1
1,585E+01	7,293E-02	6,296E-02	2,400E-01	0,1	0,1	0,1	0,2	0	0,1	0,1
2,512E+01	7,282E-02	6,287E-02	2,377E-01	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1
3,981E+01	7,268E-02	6,275E-02	2,320E-01	0,1	0,1	0	0	-0,1	0,0	0,1
6,310E+01	7,261E-02	6,264E-02	2,299E-01	0,12	0,09	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	0,1
1,000E+02	7,245E-02	6,251E-02	2,328E-01	0,1	0,1	-0,5	-0,5	-0,2	-0,4	0,2
1,585E+02	7,234E-02	6,240E-02	2,397E-01	0,1	0,1	-1	-1	-0,3	-0,8	0,4
2,512E+02	7,227E-02	6,233E-02	2,444E-01	0,1	0,1	-1,7	-1,7	-0,6	-1,3	0,6
3,981E+02	7,234E-02	6,235E-02	2,478E-01	0,1	0,1	-2,9	-2,9	-1	-2	1
6,310E+02	7,245E-02	6,238E-02	2,464E-01	0,1	0,1	-4,6	-4,8	-1,5	-4	2
1,000E+03	7,308E-02	6,289E-02	2,464E-01	0,1	0,1	-7,3	-7,6	-2,4	-6	3
1,585E+03	7,404E-02	6,371E-02	2,466E-01	0,1	0,1	-11,5	-12,1	-3,7	-9	5
2,512E+03	7,626E-02	6,568E-02	2,471E-01	0,1	0,1	-17,7	-18,7	-5,7	-14	7
3,981E+03	8,120E-02	7,029E-02	2,451E-01	0,1	0,1	-26,6	-28,2	-9,2	-21	11
6,310E+03	9,203E-02	8,066E-02	2,443E-01	0,14	0,09	-38,4	-40,8	-14,7	-31	14
1,000E+04	1,144E-01	1,026E-01	2,530E-01	0,16	0,08	-52,3	-55	-22,7	-43	18
1,585E+04	1,593E-01	1,469E-01	2,955E-01	0,20	0,08	-65,6	-68,2	-32	-55	20
2,512E+04	2,426E-01	2,259E-01	3,547E-01	0,27	0,07	-75,9	-77,9	-45,5	-66	18
3,981E+04	3,850E-01	3,619E-01	4,733E-01	0,41	0,06	-82,3	-83,7	-59,7	-75	13
6,310E+04	6,142E-01	5,794E-01	6,918E-01	0,63	0,06	-86,1	-87,1	-71,2	-81	9
1,000E+05	9,748E-01	9,224E-01	1,061E+00	0,99	0,07	-88,8	-89,4	-79,1	-86	6
1,585E+05	1,536E+00	1,458E+00	1,649E+00	1,5	0,1	-91,4	-91,9	-85,3	-90	4
2,512E+05	2,425E+00	2,302E+00	2,586E+00	2,4	0,1	-94,2	-94,5	-89,9	-93	3
3,981E+05	3,462E+00	3,175E+00	3,526E+00	3,4	0,2	-100,8	-100,5	-98,1	-100	1
6,310E+05	2,303E+01	2,785E+01	8,458E+00	20	10	-116,9	-114,3	-122,3	-118	4
1,000E+06	7,229E-02	6,290E-02	2,553E-01	0,1	0,1	-0,4	-0,4	-0,1	-0,3	0,2

Tabela 8: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 37,50\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-02	6,915E-02	6,559E-02	7,314E-02	0,069	0,004	2,7	3,2	2,9	2,9	0,3
1,585E-02	6,817E-02	6,521E-02	7,286E-02	0,069	0,004	1,8	2,5	2,3	2,2	0,4
2,512E-02	6,762E-02	6,503E-02	7,258E-02	0,068	0,004	1,6	1,8	1,7	1,7	0,1
3,981E-02	6,736E-02	6,468E-02	7,218E-02	0,068	0,004	1,4	1,2	1	1,2	0,2
6,310E-02	6,756E-02	6,410E-02	7,181E-02	0,068	0,004	0,9	0,9	0,9	0,9	0,0
1,000E-01	6,694E-02	6,413E-02	7,182E-02	0,068	0,004	0,8	0,8	0,6	0,7	0,1
1,585E-01	6,681E-02	6,390E-02	7,162E-02	0,067	0,004	0,6	0,7	0,6	0,6	0,1
2,512E-01	6,680E-02	6,368E-02	7,128E-02	0,067	0,004	0,5	0,4	0,3	0,4	0,1
3,981E-01	6,674E-02	6,347E-02	7,123E-02	0,067	0,004	0,5	0,4	0,4	0,4	0,1
6,310E-01	6,665E-02	6,348E-02	7,123E-02	0,067	0,004	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0
1,000E+00	6,642E-02	6,331E-02	7,103E-02	0,067	0,004	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
1,585E+00	6,630E-02	6,322E-02	7,090E-02	0,067	0,004	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
2,512E+00	6,622E-02	6,314E-02	7,087E-02	0,067	0,004	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1
3,981E+00	6,611E-02	6,299E-02	7,075E-02	0,067	0,004	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
6,310E+00	6,601E-02	6,289E-02	7,069E-02	0,067	0,004	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
1,000E+01	6,590E-02	6,279E-02	7,056E-02	0,066	0,004	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
1,585E+01	6,579E-02	6,267E-02	7,045E-02	0,066	0,004	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
2,512E+01	6,567E-02	6,257E-02	7,036E-02	0,066	0,004	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
3,981E+01	6,553E-02	6,244E-02	7,024E-02	0,066	0,004	0	0	0	0,0	0,0
6,310E+01	6,541E-02	6,235E-02	7,012E-02	0,066	0,004	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	0,1
1,000E+02	6,526E-02	6,226E-02	7,001E-02	0,066	0,004	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	0,1
1,585E+02	6,514E-02	6,209E-02	6,992E-02	0,066	0,004	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	0,1
2,512E+02	6,506E-02	6,201E-02	6,984E-02	0,066	0,004	-1,7	-1,4	-1,4	-1,5	0,2
3,981E+02	6,513E-02	6,199E-02	6,988E-02	0,066	0,004	-2,9	-2,4	-2,4	-2,6	0,3
6,310E+02	6,519E-02	6,199E-02	6,993E-02	0,066	0,004	-4,7	-4	-3,9	-4,2	0,4
1,000E+03	6,581E-02	6,234E-02	7,044E-02	0,066	0,004	-7,5	-6,4	-6,2	-6,7	0,7
1,585E+03	6,670E-02	6,292E-02	7,113E-02	0,067	0,004	-11,7	-10,2	-9,7	-11	1
2,512E+03	6,873E-02	6,428E-02	7,265E-02	0,069	0,004	-18,1	-15,9	-15,1	-16	2
3,981E+03	7,337E-02	6,749E-02	7,612E-02	0,072	0,004	-27,3	-24,4	-23	-25	2
6,310E+03	8,354E-02	7,496E-02	8,375E-02	0,081	0,005	-39,5	-36,1	-33,9	-37	3
1,000E+04	1,061E-01	9,158E-02	1,005E-01	0,099	0,007	-53,5	-50,4	-47,6	-51	3
1,585E+04	1,492E-01	1,263E-01	1,353E-01	0,14	0,01	-66,8	-64,8	-61,9	-65	2
2,512E+04	2,290E-01	1,936E-01	2,027E-01	0,21	0,02	-76,8	-76	-73,5	-75	2
3,981E+04	3,653E-01	3,089E-01	3,205E-01	0,33	0,03	-82,9	-82,7	-80,9	-82	1
6,310E+04	5,825E-01	4,958E-01	5,111E-01	0,53	0,05	-86,5	-86,5	-85,2	-86,1	0,8
1,000E+05	9,258E-01	7,897E-01	8,113E-01	0,84	0,07	-89	-89,1	-88,1	-88,7	0,6
1,585E+05	1,461E+00	1,247E+00	1,278E+00	1,3	0,1	-91,5	-91,5	-90,9	-91,3	0,3
2,512E+05	2,306E+00	1,972E+00	2,017E+00	2,1	0,2	-94,1	-94,3	-94	-94,1	0,2
3,981E+05	3,222E+00	2,778E+00	2,899E+00	3,0	0,2	-101,1	-99,4	-99,3	-100	1
6,310E+05	2,207E+01	1,859E+01	1,866E+01	20	2	-111,5	-117,9	-128,7	-119	9
1,000E+06	6,616E-02	6,214E-02	7,063E-02	0,066	0,004	-0,4	-0,2	-0,3	-0,3	0,1

Tabela 9: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 31,25\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	medio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-02	6,688E-02	7,210E-02	7,647E-02	0,072	0,005	2,9	3,4	2,9	3,1	0,3
1,585E-02	6,618E-02	7,203E-02	7,582E-02	0,071	0,005	2,3	2,4	2,2	2,3	0,1
2,512E-02	6,556E-02	7,202E-02	7,585E-02	0,071	0,005	1,8	1,7	1,9	1,8	0,1
3,981E-02	6,575E-02	7,143E-02	7,547E-02	0,071	0,005	1,7	1,1	1,1	1,3	0,3
6,310E-02	6,548E-02	7,100E-02	7,503E-02	0,071	0,005	1,1	1	0,9	1,0	0,1
1,000E-01	6,511E-02	7,111E-02	7,511E-02	0,070	0,005	0,9	0,7	0,8	0,8	0,1
1,585E-01	6,481E-02	7,065E-02	7,478E-02	0,070	0,005	0,6	0,7	0,6	0,6	0,1
2,512E-01	6,479E-02	7,078E-02	7,456E-02	0,070	0,005	0,5	0,6	0,4	0,5	0,1
3,981E-01	6,460E-02	7,055E-02	7,439E-02	0,070	0,005	0,4	0,5	0,3	0,4	0,1
6,310E-01	6,448E-02	7,053E-02	7,440E-02	0,070	0,005	0,4	0,4	0,3	0,4	0,1
1,000E+00	6,431E-02	7,050E-02	7,432E-02	0,070	0,005	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
1,585E+00	6,427E-02	7,026E-02	7,417E-02	0,070	0,005	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1
2,512E+00	6,412E-02	7,020E-02	7,403E-02	0,069	0,005	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0
3,981E+00	6,405E-02	7,009E-02	7,389E-02	0,069	0,005	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1
6,310E+00	6,389E-02	6,998E-02	7,380E-02	0,069	0,005	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1
1,000E+01	6,376E-02	6,986E-02	7,366E-02	0,069	0,005	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
1,585E+01	6,362E-02	6,984E-02	7,354E-02	0,069	0,005	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
2,512E+01	6,349E-02	6,970E-02	7,340E-02	0,069	0,005	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
3,981E+01	6,334E-02	6,963E-02	7,329E-02	0,069	0,005	0	0	0	0,0	0,0
6,310E+01	6,322E-02	6,953E-02	7,313E-02	0,069	0,005	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,1
1,000E+02	6,306E-02	6,946E-02	7,303E-02	0,069	0,005	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	0,1
1,585E+02	6,295E-02	6,933E-02	7,291E-02	0,068	0,005	-0,9	-0,7	-0,7	-0,8	0,1
2,512E+02	6,288E-02	6,927E-02	7,284E-02	0,068	0,005	-1,7	-1,3	-1,3	-1,4	0,2
3,981E+02	6,293E-02	6,933E-02	7,289E-02	0,068	0,005	-2,9	-2,3	-2,2	-2,5	0,4
6,310E+02	6,302E-02	6,934E-02	7,290E-02	0,068	0,005	-4,7	-3,8	-3,6	-4,0	0,6
1,000E+03	6,356E-02	6,976E-02	7,335E-02	0,069	0,005	-7,4	-6,1	-5,7	-6,4	0,9
1,585E+03	6,442E-02	7,035E-02	7,393E-02	0,070	0,005	-11,6	-9,1	-9	-10	1
2,512E+03	6,636E-02	7,170E-02	7,527E-02	0,071	0,004	-17,9	-15,1	-14	-16	2
3,981E+03	7,069E-02	7,527E-02	7,828E-02	0,075	0,004	-26,9	-23,1	-21,4	-24	3
6,310E+03	8,015E-02	8,337E-02	8,514E-02	0,083	0,003	-38,9	-34	-32	-35	4
1,000E+04	1,003E-01	1,004E-01	1,004E-01	0,1004	0,0001	-52,9	-47,9	-45,6	-49	4
1,585E+04	1,404E-01	1,360E-01	1,333E-01	0,137	0,004	-66,3	-62,2	-60,3	-63	3
2,512E+04	2,150E-01	2,053E-01	1,982E-01	0,206	0,008	-76,6	-73,3	-72,6	-74	2
3,981E+04	3,426E-01	3,241E-01	3,132E-01	0,33	0,01	-82,9	-80,7	-80,4	-81	1
6,310E+04	5,478E-01	5,179E-01	4,995E-01	0,52	0,02	-86,4	-85,3	-84,9	-85,5	0,8
1,000E+05	8,702E-01	8,231E-01	7,935E-01	0,83	0,04	-88,9	-88,3	-88	-88,4	0,5
1,585E+05	1,372E+00	1,298E+00	1,251E+00	1,31	0,06	-91,3	-91,1	-90,8	-91,1	0,3
2,512E+05	2,165E+00	2,051E+00	1,975E+00	2,1	0,1	-94,1	-94,1	-93,7	-94,0	0,2
3,981E+05	3,065E+00	2,947E+00	2,737E+00	2,9	0,2	-100,2	-99,7	-99,1	-99,7	0,6
6,310E+05	2,594E+01	1,954E+01	1,864E+01	21	4	-112,7	-126,1	-116,1	-118	7
1,000E+06	6,305E-02	7,414E-02	7,416E-02	0,070	0,006	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0,1

Tabela 10: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 25,00\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-04	4,044E-01	4,183E-01	2,050E-01	0,3	0,1	28,3	18,3	45	31	13
2,154E-04	2,325E-01	9,440E-01	1,365E-01	0,4	0,4	18,9	11,2	36,9	22	13
4,642E-04	2,131E-01	3,688E-01	1,032E-01	0,2	0,1	11,8	6,3	25,3	14	10
1,000E-03	2,008E-01	3,624E-01	8,852E-02	0,2	0,1	6,7	3,5	16,2	9	7
2,154E-03	1,922E-01	5,177E-01	8,133E-02	0,3	0,2	3,9	2	9,8	5	4
4,642E-03	1,880E-01	3,850E-01	7,727E-02	0,2	0,2	2,1	1,3	5,9	3	2
1,000E-02	1,859E-01	3,920E-01	7,573E-02	0,2	0,2	1,3	0,6	3,9	2	2
2,154E-02	1,863E-01	4,005E-01	7,595E-02	0,2	0,2	0,8	0,4	2,4	1	1
4,642E-02	1,847E-01	4,030E-01	7,496E-02	0,2	0,2	0,5	0,3	1,2	0,7	0,5
1,000E-01	1,846E-01	4,064E-01	7,413E-02	0,2	0,2	0,4	0,1	1	0,5	0,5
2,154E-01	1,843E-01	4,063E-01	7,387E-02	0,2	0,2	0,2	0	0,7	0,3	0,4
4,642E-01	1,842E-01	4,074E-01	7,354E-02	0,2	0,2	0,1	0	0,4	0,2	0,2
1,000E+00	1,838E-01	4,070E-01	7,329E-02	0,2	0,2	0,1	0	0,4	0,2	0,2
2,154E+00	1,837E-01	4,087E-01	7,301E-02	0,2	0,2	0,1	0	0,3	0,1	0,2
4,642E+00	1,834E-01	4,084E-01	7,282E-02	0,2	0,2	0,1	0	0,3	0,1	0,2
1,000E+01	1,831E-01	4,052E-01	7,257E-02	0,2	0,2	0,1	0	0,3	0,1	0,2
2,154E+01	1,829E-01	4,043E-01	7,229E-02	0,2	0,2	0,1	0	0,2	0,1	0,1
4,642E+01	1,826E-01	4,031E-01	7,205E-02	0,2	0,2	0	-0,1	-0,1	-0,1	0,1
1,000E+02	1,824E-01	4,065E-01	7,180E-02	0,2	0,2	-0,2	-0,1	-0,5	-0,3	0,2
2,154E+02	1,823E-01	4,041E-01	7,168E-02	0,2	0,2	-0,5	-0,2	-1,4	-0,7	0,6
4,642E+02	1,822E-01	4,027E-01	7,172E-02	0,2	0,2	-1,2	-0,5	-3,3	-2	1
1,000E+03	1,823E-01	4,069E-01	7,215E-02	0,2	0,2	-2,5	-1,1	-7	-4	3
2,154E+03	1,830E-01	4,068E-01	7,412E-02	0,2	0,2	-5,4	-2,3	-14,7	-7	6
4,642E+03	1,586E-01	4,107E-01	8,183E-02	0,2	0,2	-11,5	-4,9	-29,2	-15	13
1,000E+04	1,967E-01	4,143E-01	1,100E-01	0,2	0,2	-24	-10,7	-51,2	-29	21
2,154E+04	2,475E-01	4,311E-01	1,996E-01	0,3	0,1	-45,8	-23,4	-72,4	-47	25
4,642E+04	4,289E-01	5,449E-01	4,292E-01	0,47	0,07	-67,6	-44,6	-83,7	-65	20
1,000E+05	8,719E-01	9,120E-01	9,310E-01	0,90	0,03	-80,5	-65,9	-88,7	-78	12

Tabela 11: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 18,75\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-04	2,259E-01	2,143E-01	2,227E-01	0,221	0,006	221,0	6,0	46,5	30,2	29,1
2,154E-04	1,494E-01	1,475E-01	1,553E-01	0,151	0,004	150,7	4,1	35,9	31,3	30
4,642E-04	1,153E-01	1,116E-01	1,219E-01	0,116	0,005	116,3	5,2	25,2	22,8	23,2
1,000E-03	9,950E-02	9,515E-02	1,056E-01	0,100	0,005	100,1	5,2	16,6	17,1	15,3
2,154E-03	9,085E-02	8,728E-02	9,749E-02	0,092	0,005	91,9	5,2	9,8	10,5	9,4
4,642E-03	8,653E-02	8,382E-02	9,278E-02	0,086	0,005	87,7	4,6	5,7	6,3	5,7
1,000E-02	8,436E-02	8,214E-02	9,114E-02	0,086	0,005	85,9	4,7	3,4	3,7	3,3
2,154E-02	8,301E-02	8,174E-02	8,940E-02	0,085	0,004	84,7	4,1	2,4	2,4	1,8
4,642E-02	8,302E-02	7,591E-02	8,854E-02	0,082	0,006	82,5	6,3	1,2	1,5	1,3
1,000E-01	8,186E-02	7,159E-02	8,812E-02	0,081	0,008	80,5	8,3	0,9	1,2	0,8
2,154E-01	8,159E-02	7,121E-02	8,755E-02	0,080	0,008	80,1	8,3	0,7	0,7	0,6
4,642E-01	8,127E-02	7,109E-02	8,717E-02	0,080	0,008	79,8	8,1	0,5	0,7	0,4
1,000E+00	8,099E-02	7,064E-02	8,691E-02	0,080	0,008	79,5	8,2	0,4	0,5	0,4
2,154E+00	8,063E-02	7,040E-02	8,665E-02	0,079	0,008	79,2	8,2	0,5	0,5	0,4
4,642E+00	8,028E-02	7,007E-02	8,629E-02	0,079	0,008	78,9	8,2	0,4	0,5	0,4
1,000E+01	7,993E-02	6,972E-02	8,593E-02	0,079	0,008	78,5	8,2	0,4	0,5	0,3
2,154E+01	7,962E-02	6,933E-02	8,559E-02	0,078	0,008	78,1	8,2	0,3	0,3	0,3
4,642E+01	7,920E-02	6,908E-02	8,525E-02	0,078	0,008	77,8	8,2	0,1	0,1	0,1
1,000E+02	7,890E-02	6,883E-02	8,497E-02	0,078	0,008	77,6	8,2	-0,3	-0,4	-0,3
2,154E+02	7,871E-02	6,862E-02	8,476E-02	0,077	0,008	77,4	8,2	-1	-1,3	-1
4,642E+02	7,867E-02	6,857E-02	8,470E-02	0,077	0,008	77,3	8,2	-2,5	-3,2	-2,5
1,000E+03	7,893E-02	6,888E-02	8,510E-02	0,078	0,008	77,6	8,2	-5,6	-7,2	-5,4
2,154E+03	8,033E-02	7,080E-02	8,641E-02	0,079	0,008	79,2	7,9	-11,9	-15,3	-11,6
4,642E+03	8,595E-02	7,883E-02	9,215E-02	0,086	0,007	85,6	6,7	-24,2	-30,4	-23,6
1,000E+04	1,071E-01	1,081E-01	1,142E-01	0,110	0,004	109,8	3,8	-44,7	-52,7	-43,9
2,154E+04	1,790E-01	1,976E-01	1,893E-01	0,189	0,009	188,6	9,3	-68,3	-73,8	-67,5
4,642E+04	3,828E-01	4,320E-01	4,014E-01	0,41	0,02	405,4	24,8	-83,2	-85,6	-82,7
1,000E+05	8,486E-01	9,590E-01	8,869E-01	0,90	0,06	898,2	56,1	-89,3	-90,3	-89

Tabela 12: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 12,50\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-04	2,369E-01	2,535E-01	2,656E-01	0,25	0,01	30,8	41,4	38,3	37	5
2,154E-04	1,592E-01	1,605E-01	1,783E-01	0,17	0,01	31,1	37,9	31,7	34	4
4,642E-04	1,205E-01	1,184E-01	1,401E-01	0,13	0,01	25	29,1	22,5	26	3
1,000E-03	1,022E-01	9,857E-02	1,225E-01	0,11	0,01	17	19,8	14,4	17	3
2,154E-03	9,399E-02	8,944E-02	1,148E-01	0,10	0,01	10,7	12,7	8,9	11	2
4,642E-03	8,901E-02	8,426E-02	1,112E-01	0,09	0,01	6,4	7,7	5,4	7	1
1,000E-02	8,737E-02	8,144E-02	1,089E-01	0,09	0,01	3,8	4,9	3,1	3,9	0,9
2,154E-02	8,562E-02	7,952E-02	1,081E-01	0,09	0,02	2,3	3,1	1,9	2,4	0,6
4,642E-02	8,486E-02	7,843E-02	1,074E-01	0,09	0,02	1,5	2	1,2	1,6	0,4
1,000E-01	8,431E-02	7,767E-02	1,071E-01	0,09	0,02	1	1,3	0,7	1,0	0,3
2,154E-01	8,381E-02	7,706E-02	1,070E-01	0,09	0,02	0,7	1	0,5	0,7	0,3
4,642E-01	8,339E-02	7,650E-02	1,065E-01	0,09	0,02	0,6	0,8	0,5	0,6	0,2
1,000E+00	8,309E-02	7,607E-02	1,063E-01	0,09	0,02	0,5	0,8	0,4	0,6	0,2
2,154E+00	8,271E-02	7,559E-02	1,061E-01	0,09	0,02	0,5	0,8	0,4	0,6	0,2
4,642E+00	8,228E-02	7,501E-02	1,056E-01	0,09	0,02	0,5	0,7	0,4	0,5	0,2
1,000E+01	8,184E-02	7,445E-02	1,053E-01	0,09	0,02	0,5	0,7	0,3	0,5	0,2
2,154E+01	8,142E-02	7,395E-02	1,048E-01	0,09	0,02	0,4	0,5	0,3	0,4	0,1
4,642E+01	8,104E-02	7,350E-02	1,043E-01	0,09	0,02	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
1,000E+02	8,071E-02	7,314E-02	1,040E-01	0,09	0,02	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	0,1
2,154E+02	8,049E-02	7,287E-02	1,037E-01	0,09	0,02	-1,2	-1,1	-0,8	-1,0	0,2
4,642E+02	8,044E-02	7,277E-02	1,037E-01	0,09	0,02	-2,9	-3	-2,1	-2,7	0,5
1,000E+03	8,069E-02	7,314E-02	1,042E-01	0,09	0,02	-6,5	-6,8	-4,74	-6	1
2,154E+03	8,283E-02	7,496E-02	1,057E-01	0,09	0,02	-13,8	-14,5	-10	-13	2
4,642E+03	9,071E-02	8,261E-02	1,150E-02	0,06	0,04	-27,8	-29,1	-20,6	-26	5
1,000E+04	1,199E-01	1,113E-01	1,320E-01	0,12	0,01	-49,4	-51,2	-39,6	-47	6
2,154E+04	2,124E-01	2,014E-01	2,092E-01	0,208	0,006	-71	-72,5	-62,9	-69	5
4,642E+04	4,541E-01	4,349E-01	4,271E-01	0,44	0,01	-83,4	-84,2	-79,3	-82	3
1,000E+05	9,908E-01	9,504E-01	9,246E-01	0,96	0,03	-88,8	-89,2	-86,9	-88	1

Tabela 13: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 6,25\%$

f (Hz)	$ Z (\Omega)$					ϕ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	médio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-04	2,528E-01	2,535E-01	2,504E-01	0,252	0,002	37,3	41,4	44	41	3
2,154E-04	1,683E-01	1,605E-01	1,570E-01	0,162	0,006	32,6	37,9	38,4	36	3
4,642E-04	1,324E-01	1,184E-01	1,151E-01	0,122	0,009	23,9	29,1	28,6	27	3
1,000E-03	1,166E-01	9,857E-02	9,528E-02	0,10	0,01	15,4	19,8	19,2	18	2
2,154E-03	1,150E-02	8,944E-02	8,654E-02	0,06	0,04	9,6	12,7	12,4	12	2
4,642E-03	1,090E-01	8,426E-02	8,223E-02	0,09	0,01	5,4	7,7	7,8	7	1
1,000E-02	1,055E-01	8,114E-02	8,007E-02	0,09	0,01	1,6	4,9	4,8	4	2
2,154E-02	1,004E-01	7,952E-02	7,849E-02	0,09	0,01	-0,3	3,1	2,8	2	2
4,642E-02	9,641E-02	7,843E-02	7,788E-02	0,08	0,01	0,4	2	1,9	1,4	0,9
1,000E-01	9,817E-02	7,767E-02	7,727E-02	0,08	0,01	1	1,3	1,2	1,2	0,2
2,154E-01	9,758E-02	7,706E-02	7,689E-02	0,08	0,01	0,4	1	0,9	0,8	0,3
4,642E-01	9,648E-02	7,650E-02	7,655E-02	0,08	0,01	0,2	0,8	0,7	0,6	0,3
1,000E+00	9,657E-02	7,607E-02	7,619E-02	0,08	0,01	0,2	0,8	0,6	0,5	0,3
2,154E+00	9,629E-02	7,559E-02	7,585E-02	0,08	0,01	0,2	0,8	0,6	0,5	0,3
4,642E+00	9,606E-02	7,501E-02	7,544E-02	0,08	0,01	0,2	0,7	0,6	0,5	0,3
1,000E+01	9,589E-02	7,445E-02	7,499E-02	0,08	0,01	0,1	0,7	0,6	0,5	0,3
2,154E+01	9,572E-02	7,395E-02	7,463E-02	0,08	0,01	0,1	0,5	0,5	0,4	0,2
4,642E+01	9,542E-02	7,350E-02	7,427E-02	0,08	0,01	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
1,000E+02	9,506E-02	7,314E-02	7,406E-02	0,08	0,01	-0,1	-0,2	-0,3	-0,2	0,1
2,154E+02	9,472E-02	7,287E-02	7,397E-02	0,08	0,01	-0,6	-1,1	-1,3	-1,0	0,4
4,642E+02	9,436E-02	7,277E-02	7,396E-02	0,08	0,01	-1,8	-3	-3,3	-2,7	0,8
1,000E+03	9,485E-02	7,314E-02	7,450E-02	0,08	0,01	-4,1	-6,8	-7,2	-6	2
2,154E+03	9,580E-02	7,496E-02	7,694E-02	0,08	0,01	-8,9	-14,5	-15,2	-13	3
4,642E+03	9,955E-02	8,261E-02	8,564E-02	0,089	0,009	-18,5	-29,1	-29,9	-26	6
1,000E+04	1,146E-01	1,113E-01	1,168E-01	0,114	0,003	-36,4	-51,2	-51,7	-46	9
2,154E+04	1,728E-01	2,014E-01	2,110E-01	0,20	0,02	-61,1	-72,5	-72,4	-69	7
4,642E+04	3,511E-01	4,349E-01	4,546E-01	0,41	0,05	-78,7	-84,2	-84,2	-82	3
1,000E+05	7,607E-01	9,504E-01	9,953E-01	0,9	0,1	-86,6	-89,2	-89,2	-88	2

Tabela 14: Valores de $|Z|$ e ϕ , para $S = 0\%$

f (Hz)	Z (Ω)					φ (grau)				
	ELEMENTO 1	ELEMENTO 2	ELEMENTO 3	medio	σ	ELEM 1	ELEM 2	ELEM 3	médio	σ
1,000E-04	2,364E-01	2,445E-01	3,126E-01	0,26	0,04	40,8	40,8	35,5	39	3
2,154E-04	1,488E-01	1,570E-01	2,002E-01	0,17	0,03	39,9	36,9	30,3	36	5
4,642E-04	1,067E-01	1,184E-01	1,572E-01	0,13	0,03	30,9	27,3	21,3	27	5
1,000E-03	8,820E-02	9,961E-02	1,474E-01	0,11	0,03	20,1	17,5	13	17	4
2,154E-03	7,871E-02	9,155E-02	1,429E-01	0,10	0,03	12,7	10,6	7,7	10	3
4,642E-03	7,397E-02	8,847E-02	1,370E-01	0,10	0,03	7,9	6	4,8	6	2
1,000E-02	7,124E-02	8,660E-02	1,358E-01	0,10	0,03	5,1	3,3	2,8	4	1
2,154E-02	6,973E-02	8,492E-02	1,349E-01	0,10	0,03	3,3	2	1,6	2	0,9
4,642E-02	6,864E-02	8,524E-02	1,348E-01	0,10	0,03	2,1	1,7	1,1	1,6	0,5
1,000E-01	6,803E-02	8,618E-02	1,341E-01	0,10	0,03	1,5	0,8	0,7	1,0	0,4
2,154E-01	6,747E-02	8,552E-02	1,334E-01	0,10	0,03	1	0,5	0,4	0,6	0,3
4,642E-01	6,697E-02	8,576E-02	1,330E-01	0,10	0,03	0,9	0,6	0,4	0,6	0,3
1,000E+00	6,653E-02	8,559E-02	1,326E-01	0,09	0,03	0,8	0,4	0,4	0,5	0,2
2,154E+00	6,607E-02	8,553E-02	1,321E-01	0,09	0,03	0,8	0,4	0,4	0,5	0,2
4,642E+00	6,555E-02	8,478E-02	1,316E-01	0,09	0,03	0,8	0,4	0,4	0,5	0,2
1,000E+01	6,501E-02	8,404E-02	1,310E-01	0,09	0,03	0,8	0,3	0,4	0,5	0,3
2,154E+01	6,450E-02	8,361E-02	1,305E-01	0,09	0,03	0,6	0,3	0,3	0,4	0,2
4,642E+01	6,403E-02	8,299E-02	1,300E-01	0,09	0,03	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1
1,000E+02	6,363E-02	8,263E-02	1,297E-01	0,09	0,03	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,0
2,154E+02	6,333E-02	8,291E-02	1,294E-01	0,09	0,03	-1,2	-1	-0,7	-1,0	0,3
4,642E+02	6,323E-02	8,309E-02	1,293E-01	0,09	0,03	-3,4	-2,6	-1,9	-2,6	1
1,000E+03	6,364E-02	8,400E-02	1,296E-01	0,09	0,03	-7,6	-5,8	-4,2	-6	2
2,154E+03	6,565E-02	8,592E-02	1,310E-01	0,09	0,03	-16,2	-12,4	-9	-13	4
4,642E+03	7,399E-02	9,345E-02	1,365E-01	0,10	0,03	-31,9	-25	-18,8	-25	7
1,000E+04	1,038E-01	1,197E-01	1,584E-01	0,13	0,03	-54,3	-45,6	-36,5	-45	9
2,154E+04	1,928E-01	2,042E-01	2,394E-01	0,21	0,02	-74,5	-68,2	-60,1	-68	7
4,642E+04	4,211E-01	4,315E-01	4,752E-01	0,44	0,03	-85,6	-81,8	-77,3	-82	4
1,000E+05	9,277E-01	9,381E-01	1,015E-03	0,6	0,5	-90	-87,9	-85,8	-88	2