



Gilcinea Rangel Pesenti

**Medição remota como estratégia de monitoramento de
baterias estacionárias: Estudo de caso em uma subestação
de energia elétrica**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Prof. Mauricio Nogueira Frota

Rio de Janeiro
Dezembro de 2012



Gilcinea Rangel Pesenti

**Medição remota como estratégia de monitoramento de
baterias estacionárias: Estudo de caso em uma subestação
de energia elétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Metrologia pelo
Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Mauricio Nogueira Frota

Presidente / Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PUC-Rio)

Prof^a. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós Graduação em Metrologia (PUC-Rio)

Dr. José Antonio Donizete Rossi

CPqD

Prof. Jose Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 27 de dezembro de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Gilcinea Rangel Pesenti

Graduada em Bacharel e Licenciatura em Química, possui MBA em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getulio Vargas (FGV) e Pós-graduação em Análise de Sistemas. Tem 24 anos de experiência profissional trabalhados em concessionária de energia elétrica, com atuação em gerência de projetos, avaliação industrial de fornecedores, avaliação empresarial de fornecedores, avaliação de responsabilidade social, diligenciamentos e inspeções de materiais. Participa de revisões de Normas Brasileiras (ABNT). Atualmente é responsável técnica do laboratório de química de uma concessionária de energia elétrica. Autora de trabalhos apresentados em eventos técnico-científicos no Brasil e no exterior.

Ficha Catalográfica

Pesenti, Gilcinea Rangel

Medição remota como estratégia de monitoramento de baterias estacionárias: estudo de caso em uma subestação de energia elétrica / Gilcinea Rangel Pesenti ; orientador: Mauricio Nogueira Frota. – 2012.
83 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para a Qualidade e Inovação), 2012.
Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Medição remota. 3. Monitoramento de baterias. 4. Sistema de energia. 5. Subestações. I. Frota, Maurício Nogueira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD 389.1

Dedico esta dissertação à minha amada filha Luana,
que me dá força para superar todas as
dificuldades da vida.

Agradecimentos

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

Especialmente, algumas pessoas, ajudaram diretamente e indiretamente para que este trabalho fosse concluído, onde presto minha sincera homenagem:

Ao professor Maurício, que para mim foi uma imensa honra e orgulho tê-lo como orientador e aos demais professores da metrologia da PUC-Rio, que foram tão importantes na minha vida acadêmica.

À pesquisadora Maria de Fátima Rosolem, ao Pesquisador Raul Beck e aos demais colegas do CPqD, que muito contribuíram para esta realização.

Aos meus pais, meu marido Ivan, minha tia Luiza, minha sobrinha Karine e a toda família que, de forma especial e carinhosa me deram força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades.

Aos amigos José Daniel, Maria Helena e Ângela pelo incentivo e pelo apoio constante.

Ao José Tenório e demais colegas de trabalho da Light que acreditaram no meu projeto e me incentivaram a ir em frente.

À banca examinadora, composta por Dr. José Antonio Donizete Rossi e Dra. Elisabeth Costa Monteiro, pelos comentários e sugestões apresentadas com o objetivo de valorizar o trabalho.

Resumo

Pesenti, Gilcinea Rangel; Frota, Mauricio Nogueira. **Medição remota como estratégia de monitoramento de baterias estacionárias: Estudo de caso em uma subestação de energia elétrica.** Rio de Janeiro, 2012. 83p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente dissertação tem por objetivo geral validar em condições reais de operação, a técnica (desenvolvida em ambiente laboratorial) de monitoramento remoto de baterias estacionárias e como objetivos específicos identificar as limitações das tecnologias convencionais de monitoramento de baterias estacionárias, avaliar a confiabilidade do método de monitoramento remoto proposto e justificar a alternativa tecnológica proposta à luz do impacto econômico que dela decorrem. O desenvolvimento deste tema de dissertação de mestrado foi motivado pelas contribuições que poderá produzir para a Light e demais empresas dos setores elétricos, óleo e gás, bancário, de telecomunicações, entre outros setores que utilizam baterias estacionárias. A Light e o CPqD realizaram o projeto de P&D Light-Aneel 033/2008. Este projeto teve como objetivo o aumento da confiabilidade dos serviços auxiliares das subestações e redução dos custos de manutenção. Para tal efeito, foi desenvolvido um sistema automatizado de monitoramento e gestão individual e remota de todos os elementos que compõe o banco de baterias. A pesquisa de mestrado avaliou, quantitativamente, a confiabilidade da medição remota realizada na subestação Baependi da Light, na cidade do Rio de Janeiro. A metodologia aplicada na presente dissertação consiste em estudos estatísticos (Testes de hipóteses paramétricos e não paramétricos) para comparação de resultados de tensão elétrica e impedância obtidos em condições reais de operação (Medições SIMBA-GEBAT) em relação ao equipamento portátil de medição. A pesquisa validou aos níveis de significância de 90%, 95% e 99%, a metodologia empregada para avaliação remota de baterias para os ensaios de impedância e tensão elétrica e identificou a repetitividade da metodologia da avaliação remota. O resultado da pesquisa foi fundamental para provar a credibilidade do sistema de monitoramento remoto de baterias. A utilização desse sistema ora validado contribuirá para o aumento da confiabilidade dos equipamentos que utilizam sistema de backup, além de redução dos custos de manutenção preventiva.

Palavras-chave

Metrologia; medição remota; monitoramento de baterias; sistema de backup; subestações.

Abstract

Pesenti, Gilcinea Rangel; Frota, Mauricio Nogueira (Advisor). **Remote measurement as strategy to monitor stationary batteries: case study in an electric power substation.** Rio de Janeiro, 2012. 83p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work has the general objective of validating, under real operation conditions, the technique (developed in a laboratorial environment) of remote monitoring of stationary batteries. The development of this MSc dissertation theme was motivated by the contributions that it is expected to give to the Light S.E.S.A. and other companies of the Electric Sector, Oil and Gas, Bank, IT and many others which use stationary batteries in their DC energy supply. Light and CPqD developed together a Research and Development Project named R&D Light-ANEEL 033/2008. This project had as its main objective to increase the reliability of the ancillary services of substations and to reduce their maintenance costs. To reach this target, was developed an automated monitoring system and a remote individual management of all elements that form the batteries bank. The MSc research evaluated, quantitatively, the reliability of the remote metering, performed to the Light's Baependi substation, which is located in the south zone of Rio de Janeiro City. The methodology applied in this dissertation consists of statistical studies (Hypothesis testing parametric and nonparametric), for comparison of voltage and impedance results obtained in actual operating conditions (Measurements SIMBA-GEBAT) compared to portable measurement. The research has validated, to the significance levels of 90%, 95% and 99%, the methodology used to the remote evaluation of batteries relatively to the impedance and voltage essays, and has also identified the repetitivity of the remote evaluation methodology. The research results were fundamental to prove the credibility of the remote monitoring system of batteries. The use of this system will contribute to increase the reliability of the equipments which use backup systems, besides promoting a cost reduction of the predictive maintenance.

Keywords

Metrology; remote measurement; batteries monitoring; backup system; substation.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Baterias: conceitos, definições e legislação aplicável	16
1.1.1.	Conceitos Básicos	17
1.1.2.	Documentos normativos e regulatórios	18
1.2.	Contextualização da pesquisa	18
1.3.	Caracterização do problema da pesquisa	20
1.4.	Motivação	20
1.5.	Objetivos	21
1.6.	Metodologia	21
1.7.	Estrutura da dissertação	22
2	Baterias estacionárias	24
2.1.	Bateria chumbo-ácida: estado-da-arte	25
2.1.1.	Bateria chumbo-ácida ventilada	25
2.1.2.	Bateria chumbo-ácida regulada por válvula	27
2.2.	Bateria: fonte auxiliar de energia na subestação	30
2.3.	Bateria: métodos de avaliação de desempenho	31
3	Monitoramento remoto de baterias	35
3.1.	Funcionalidades do protótipo	35
3.2.	Definição dos parâmetros monitoráveis	36
3.3.	Instalação e teste de campo	36
4	Validação da medição remota em ambiente real de operação:	
	Procedimentos experimentais e resultados	38
4.1.	Procedimentos de ensaio para validação das medições	38
4.2.	Calibração do equipamento portátil	38
4.3.	Análises estatísticas dos dados	40
4.3.1.	Análise estatística da medição de impedância	41
4.3.1.1.	Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S)	42

4.3.1.2. Teste de significância para duas variâncias	52
4.3.1.3. Independência nas medições das amostras	54
4.3.1.4. Teste de significância para a igualdade de duas médias	54
4.3.2. Análise estatística da medição da tensão elétrica	56
4.3.2.1. Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S)	58
4.3.2.2. Teste de significância para duas variâncias	67
4.3.2.3. Teste de significância para a igualdade de duas médias	69
5 Conclusões	71
Referências bibliográficas	73
Anexo 1 – Certificado de calibração shunt de 60 a / 60 mv	75
Anexo 2 – Tabela Distribuição D	78
Anexo 3- Tabela de Distribuição F para $1-\alpha = 90\%$	79
Anexo 4 – Tabela de Distribuição F para: $1-\alpha = 95\%$	80
Anexo 5 – Tabela de Distribuição F para: $1-\alpha = 99\%$	81
Anexo 6 – Tabela Distribuição Normal (Área 0 a $+\infty$)	82
Anexo 7 – Tabela Distribuição Normal (Área $-\infty$ a 0)	83

Lista de figuras

Figura 1 – Desenho da pesquisa	22
Figura 2 – Sistema de baterias estacionárias	31
Figura 3 – Curva de descarga de uma bateria chumbo-ácida ventilada	33
Figura 4 – Arquitetura do sistema de monitoramento remoto	36
Figura 5 – Unidade de Medida do protótipo do sistema	37
Figura 6 – Unidade de Controle do protótipo do sistema	37
Figura 7 – Sistema de baterias estacionárias localizado na subestação Baependi	37
Figura 8 – Ensaio para validação das medições	39
Figura 9 – Histograma de frequência: medições de impedância SIMBA-GEBAT	44
Figura 10 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada	46
Figura 11 – Histograma de frequência: Medidas de impedância obtidas utilizando o equipamento portátil	48
Figura 12 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada	51
Figura 13 – Histograma de frequência: Medições da tensão elétrica do SIMBAT-GEBAT	59
Figura 14 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada	62
Figura 15 – Histograma de frequência: Medidas da tensão Elétrica do Equipamento Portátil	64
Figura 16 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada	66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Expectativa de vida útil das baterias chumbo-ácida VRLA	29
Tabela 2 – Valores obtidos nas medições de resistência elétrica	40
Tabela 3 – Medições de Impedância SIMBA-GEBAT (Medidas 1)	41
Tabela 4 – Medições de Impedância do Equipamento Portátil (Medidas 2)	42
Tabela 5 – Estatística descritiva	43
Tabela 6 – Intervalo do histograma	43
Tabela 7 – Tabela de frequência absoluta	44
Tabela 8 – Cálculo da frequência esperada	45
Tabela 9 – Cálculo da estatística D	45
Tabela 10 – Estatística descritiva	47
Tabela 11 – Intervalo do histograma	48
Tabela 12 – Tabela de frequência absoluta	49
Tabela 13 – Cálculo da frequência esperada	50
Tabela 14 – Cálculo da frequência esperada	50
Tabela 15 – Medidas da tensão elétrica SIMBA-GEBAT (Medidas 1)	57
Tabela 16 – Medida da tensão elétrica do Equipamento Portátil (Medidas 2)	57
Tabela 17 – Estatística descritiva	58
Tabela 18 – Intervalo do histograma	59
Tabela 19 – Tabela de frequência absoluta	60
Tabela 20 – Cálculo da frequência esperada	60
Tabela 21 – Cálculo da estatística D	61
Tabela 22 – Estatística descritiva	63
Tabela 23 – Intervalo do histograma	63
Tabela 24 – Tabela de frequência absoluta	64
Tabela 25 – Cálculo da frequência esperada	65
Tabela 26 – Cálculo da estatística D	65

Abreviaturas e Termos

$ f_a - e_a $	Módulo da diferença entre a Frequência absoluta da amostra acumulada e a Frequência esperada acumulada
$1-\alpha$	Nível de confiança
A	ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ah	ampère-hora
Ah/kg	ampère-hora/kilograma
Ah/l	ampère-hora/litro
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	Capacidade específica
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
Cr	Capacidade real da bateria
D	Distribuição de probabilidade D
D_{max}	Estatística do teste Kolmogorov-Smirnov
E	Tensão elétrica
E.C.	Energia específica
e_a	Frequência esperada acumulada
e_i	Frequência esperada
EUA	Estados Unidos de América
F	Distribuição F-Snedecor
f_a	Frequência absoluta da amostra acumulada
F_{cal}	Estatística do teste de igualdade entre duas variâncias
f_i	Frequência absoluta da amostra
GEBAT	Gestão de Bateria
GSM	Global System for Mobile
H_1	Hipótese alternativa
H_2	Hidrogênio
H_2O	Água
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
H_0	Hipótese nula
HW	Hardware
i	Corrente
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
k	Fator de abrangência
kg	Quilograma
K-S	Kolmogorov-Smirnov
l	litro
MBA	Master of Business Administration
ml	mililitro

mOhm	miliohm
MSc.	Master of Science
mV	milivolt
N	Número do intervalo adotado
n	Tamanho da amostra
NBR	Norma Brasileira
O ₂	Oxigênio gasoso
P	Potência específica
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
Pb	Chumbo
PbO ₂	Peróxido de chumbo
PbSO ₄	Sulfato de chumbo
PósMQI	Programa de Pós-graduação em Metrologia, Qualidade, Inovação e Sustentabilidade
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RA	Região de aceitação
RC	Região Crítica
s ²	Variância amostral
Sc	Desvio padrão amostral conjunto
SIMBA-GEBAT	Sistema de Monitoração Remota de Bateria
SW	Software
t	Tempo
t _{cal}	Estatística do teste de igualdade entre duas médias
UC	Unidade de Controle
UM	Unidade de Medição
UPS	Uninterruptible Power Supply
V	Volt
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia
VRLA	Valve Regulated Lead Acid
W/kg	watt/quilograma
Wh	watt-hora
Wh/kg	watt-hora/quilograma
Wh/l	watt-hora/litro
Wm	Energia específica mássica
Wv	Energia específica volumétrica
X	Valor da medição
\bar{x}	Média amostral
Z	Valor da variável da distribuição Normal de Probabilidade
Z~N(0,1)	Distribuição normal de probabilidade com média zero e variância um
α	Nível de significância
μ	Média populacional
σ	Desvio padrão populacional
σ ²	Variância populacional
φ	Grau de liberdade

“Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós”
Antoine de Saint-Exupéry

1 Introdução

A geração, a transmissão e a distribuição de energia elétrica são de extrema importância no mundo atual e na vida das pessoas. Estes sistemas não são perfeitos e estão sujeitos a falhas de operação. No entanto, várias aplicações de grande porte (e.g.: *data center*, centrais telefônicas, subestações de energia, controle de tráfego metroviário, sistemas de emergência de plataformas de petróleo) exigem alto grau de confiabilidade e não podem deixar de operar caso haja uma falha na energia comercial. Nesses casos, a opção por outra fonte *backup* de energia faz-se necessário como estratégia de suprir esta falta de energia durante o período da falha, que pode durar minutos ou mesmo horas.

O acumulador elétrico, também denominado bateria, é a fonte de energia mais utilizada nessas aplicações. Este é um dos poucos dispositivos que consegue armazenar energia por grandes períodos de tempo e disponibilizá-la quando solicitado.

Em uma subestação de energia elétrica o uso da bateria é de vital importância na confiabilidade dos chamados *serviços auxiliares*. É a bateria que assegura que todo o comando e o controle dos componentes eletrônicos se mantêm em operação durante uma falha da energia comercial. A falta de atuação da bateria pode provocar grandes prejuízos em uma subestação de energia elétrica. A tecnologia de bateria mais utilizada nas aplicações de sistemas de *backup* de grande porte é a bateria chumbo-ácida estacionária. A vida útil projetada desta tecnologia para esta aplicação é de dez anos, considerando as condições operacionais. Para garantir esta durabilidade e confiabilidade do sistema, o usuário deve periodicamente realizar manutenções na bateria. Na realização da manutenção os seguintes parâmetros devem ser verificados: inspeção visual; medições de densidade (bateria ventilada); tensão elétrica, temperatura; corrente de flutuação. No entanto, somente estes parâmetros não indicam com precisão o grau de degradação da bateria. Comumente, o ensaio tradicional para avaliar esta degradação é o ensaio de capacidade. Este é um ensaio invasivo já que a sua

realização requer a retirada da bateria de operação. É longo e necessita de acompanhamento por profissional qualificado [1-4].

A introdução da telefonia móvel em nível mundial e o crescimento da área de telecomunicações, na virada da década de 80, passaram a requerer métodos mais rápidos, mais eficazes e menos invasivos para se avaliar o grau de degradação da bateria chumbo-ácida. Vários grupos de pesquisas, principalmente nos EUA, se dedicaram a este tema e concluíram que a degradação da bateria chumbo-ácida deve-se à variação de sua resistência interna, impactando na sua durabilidade. Foi com base nessa constatação que a resistência interna da bateria passou a ser considerada a propriedade crítica para se avaliar, de forma permanente, o grau de degradação das baterias chumbo-ácidas estacionárias.

Fundamentado nesse preceito, foram desenvolvidos e industrializados alguns equipamentos manuais que permitem medir a resistência interna da bateria por meio da sua condutância ou impedância. Esses equipamentos foram introduzidos no Brasil a partir de 2002 e têm sido muito utilizados por empresas de telecomunicações e dos setores de energia, notadamente o elétrico e o petrolífero [5-9].

Com o objetivo de otimizar os custos de operação e manutenção e contornar a escassez de mão de obra qualificada, as empresas vêm investindo em soluções que visam a automação e o monitoramento a distância de seus equipamentos [10-11].

1.1.

Baterias: conceitos, definições e legislação aplicável

Aderente ao jargão internacional, esta dissertação de mestrado, faz uso dos conceitos técnicos tal qual definidos no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM) [12], complementados por denominações técnicas específicas utilizadas por profissionais de sistemas de monitoramento de baterias estacionárias.

1.1.1. Conceitos Básicos

Uma bateria recarregável é um dispositivo que armazena energia elétrica na forma de compostos ativos eletroquimicamente (energia química) e, vice-versa, transforma energia química em elétrica. Ou seja, é um dispositivo capaz de armazenar e gerar energia elétrica mediante reações eletroquímicas de oxidação (perda de elétrons) e redução (ganho de elétrons). Nessas reações, a transferência dos elétrons ocorre no circuito elétrico, o que gera a corrente elétrica. Quando a bateria é utilizada, isto é, na descarga, a energia química armazenada nos eletrodos se transforma direta e espontaneamente em energia elétrica.

Fisicamente a unidade básica de uma bateria é uma célula ou elemento. A associação de dois ou mais elementos, em série ou em paralelo, ou ambos, constitui uma bateria. Cada célula eletroquímica é formada por dois eletrodos (placas positiva e negativa) separados por um eletrólito (meio condutor). O eletrodo positivo (cátodo) é constituído pelo material ativo que possui maior potencial de oxirredução (redox). Por outro lado, o eletrodo negativo (ânodo) é constituído pelo material ativo com menor potencial redox. O eletrólito pode ser líquido, sólido ou gasoso.

Durante o processo de descarga, a energia química armazenada nos eletrodos se transforma diretamente e espontaneamente em energia elétrica (através das reações de oxidação/redução dos materiais ativos das placas). Durante o processo de carga, faz-se necessário fornecer energia elétrica para transformar os materiais gerados na descarga nos produtos eletroquimicamente ativos originais. O desempenho de uma bateria depende das características de fabricação de seus elementos [13]. Os parâmetros eletroquímicos mais utilizados para caracterizar uma célula e bateria são:

- **Tensão elétrica (E):** representa o potencial, ou força eletromotriz, de uma célula eletroquímica, dada pela diferença entre os potenciais de oxidação e redução dos materiais ativos dos cátodos e ânodos. Unidade de medida: Volt (V).
- **Capacidade específica (C):** é a quantidade total de corrente por unidade de tempo que uma célula ou bateria é capaz de fornecer. Unidade de medida: ampère-hora (Ah). Para comparar baterias utiliza-se o valor de capacidade normalizado em massa (Ah/kg) ou volume (Ah/l).
- **Energia específica (E.C.):** Indica a quantidade de energia elétrica que uma célula ou bateria pode armazenar. Unidade de medida: Wh.

- **Energia específica mássica (W_m):** $W_m = E.C./(\text{peso da bateria})$. Unidade de medida: Wh/kg
- **Energia específica volumétrica (W_v):** $W_v = E.C./(\text{volume da bateria})$. Unidade de medida: Wh/l
- **Potência específica (P):** reflete a capacidade de uma bateria para fornecer altas taxas de corrente. Unidade de medida: W/kg (mássica) ou W/l (volumétrica).
- **Ciclos de vida:** é o número de ciclos de carga/descarga que a bateria pode realizar até que sua capacidade se reduza ao valor percentual limite (especificado por tecnologia) em relação ao valor nominal.

1.1.2. Documentos normativos e regulatórios

As normas aplicáveis e de interesse ao desenvolvimento da presente dissertação são: NBR 14198 e NBR 14206, referente à terminologia de baterias chumbo-ácidas ventiladas e reguladas por válvula.

A legislação vigente no Brasil aplicável às baterias chumbo-ácidas estacionárias fundamenta-se no seguinte acervo legal e normativo [14]:

- Resolução Anatel 570: norma para certificação e homologação de acumuladores chumbo-ácidos estacionários regulados por válvula;
- Resolução Anatel 597: norma para certificação e homologação de acumuladores chumbo-ácidos estacionários ventilados;
- ABNT NBR 14197: acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado - especificação;
- ABNT NBR 14199: acumulador chumbo-ácido estacionário ventilado - método de ensaio;
- ABNT NBR 14204: acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula - especificação;
- ABNT NBR 14205: acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula - método de ensaio.

1.2. Contextualização da pesquisa

Com o objetivo de implantar soluções mais eficazes para avaliar e monitorar a integridade de baterias utilizadas em suas subestações, a Light desenvolveu projetos de P&D em parceria com o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD). Em 2001, desenvolveu o projeto de P&D referência Light-Aneel 3105/01 [1], que teve por objetivo implantar a metodologia de ensaio

de condutância e impedância para avaliação das baterias em operação nas subestações da Light.

A metodologia desenvolvida em parceria com o CPqD mostrou ser eficiente no acompanhamento do estado de degradação de baterias. Como contribuição do P&D ao setor elétrico, a solução proposta passou a ser adotada por empresas do setor elétrico.

Após a implementação desta metodologia como ferramenta de manutenção das baterias de suas subestações, a Light sentiu a necessidade de dispor de um sistema, capaz de realizar a gestão das medições de condutância, impedância, tensão elétrica de flutuação, densidade e teste de capacidade. E, também, de ser capaz de gerar relatórios e possibilitar a extração de um maior número de informações que venham a auxiliar a concessionária em suas operações de manutenção corretiva e preditiva das baterias.

Foi com esse propósito que o CPqD e a Light desenvolveram o projeto de P&D complementar, referência Light-Aneel 019/2006 [2], visando disponibilizar um sistema de gestão da operação e manutenção de baterias chumbo-ácidas ventiladas e reguladas por válvulas, instaladas em subestações da Light. Como produto deste P&D foi desenvolvido o software de gestão de baterias (GEBAT). Por meio de medições da condutância ou impedância dos elementos da bateria tornou-se possível projetar uma estimativa do estado de degradação da bateria para os próximos dois anos.

Em continuidade a este segundo projeto, a Light e o CPqD desenvolveram o projeto de P&D Light-Aneel 033/2008 [4]. Projeto que teve por objetivo aumentar a confiabilidade dos serviços auxiliares das subestações e reduzir os custos associados de manutenção. Para atingir este propósito, o projeto de P&D desenvolveu um sistema automatizado e remoto de monitoramento e gestão individual de todos os elementos que compõem o banco de baterias. O sistema está constituído de dois hardwares e um software, no qual é possível obter em tempo real e de forma automática os resultados de impedância, corrente, tensão elétrica de flutuação, temperatura, nível de eletrólito em cada elemento ou monobloco da bateria [11]. Toda a informação de gestão e avaliação das medições do sistema de monitoramento remoto foi implementada no software de gestão de baterias desenvolvido no projeto P&D Light-Aneel 019/2006 [2].

Fazendo uso dos resultados desses P&D a presente pesquisa de mestrado se desenvolveu conforme caracterizado na seção a seguir.

1.3. Caracterização do problema da pesquisa

Nos últimos 15 anos observa-se um esforço por parte de fabricantes e usuários de baterias estacionárias para implantar metodologias de avaliação do estado de degradação da bateria, sem a necessidade de desconectá-las dos equipamentos consumidores. A presente pesquisa de mestrado atende a este propósito, complementando iniciativas que resultaram das atividades de pesquisa e desenvolvimento acima caracterizadas. Assim, facilitando a realização de ensaios que fazem uso de equipamentos comerciais portáteis para medir a condutância, impedância ou resistência interna de baterias, o trabalho desenvolveu e validou metrologicamente um protótipo de medição e monitoramento remoto de baterias do tipo estacionárias.

A presente dissertação responde as seguintes questões:

- Quais as razões que levam à alternativa tecnológica proposta?
- Quais são os benefícios e a confiabilidade do método de monitoramento remoto proposto?
- Qual o impacto econômico resultante da introdução da alternativa tecnológica proposta?

Como estudo de caso, a pesquisa de mestrado avaliou, quantitativamente, a confiabilidade da medição remota realizada na subestação Baependi da Light, na cidade do Rio de Janeiro.

1.4. Motivação

O desenvolvimento deste tema de dissertação de mestrado foi motivado pelas contribuições que poderá produzir para a Light e demais empresas dos setores elétricos, petrolíferos, bancários, de telecomunicações, entre outros setores que utilizam baterias estacionárias. Dentre os benefícios destacam-se:

- avanço do conhecimento no Brasil, no que tange ao monitoramento remoto de baterias estacionárias;
- ganho de eficácia do monitoramento remoto das baterias estacionárias;
- aprimoramento da solução de hardware (HW) e software (SW);
- avaliação metrológica das medições ôhmicas em baterias;
- fomento de projetos de inovação voltados às necessidades da concessionária.

1.5. Objetivos

A presente dissertação tem por objetivo geral validar em condições reais de operação, a técnica (desenvolvida em ambiente laboratorial) de monitoramento remoto de baterias estacionárias.

Em termos específicos, a dissertação busca:

- Identificar as limitações das tecnologias convencionais de monitoramento de baterias estacionárias e discutir as vantagens da alternativa tecnológica proposta no âmbito do P&D Light-Aneel 033/2008 [4];
- Avaliar a confiabilidade do método de monitoramento remoto proposto, validando-o em condições normais de operação;
- Justificar a alternativa tecnológica proposta à luz do impacto econômico que dela decorrem.

1.6. Metodologia

A presente pesquisa é classificada de acordo com a taxionomia de Vergara (2005) [15]. Assim, quanto aos fins, é **descritiva** (expõe características de determinado fenômeno, estabelece correlações entre variáveis e define sua natureza); **aplicada** (fundamentalmente motivada pela necessidade de resolver problemas concretos, mais imediatos ou não). Quanto aos meios de investigação, classifica-se como: **bibliográfica**, **documental** e **experimental**. No que concerne à natureza da pesquisa, tem característica predominantemente **quantitativa**.

O seu desenvolvimento foi estruturado segundo as seguintes fases:

- **Fase 1** – Exploratória: pesquisa bibliográfica e documental como base teórica da dissertação;
- **Fase 2** – Pesquisa de Campo: medições em condições normais de operação, cálculo de incerteza e avaliação de impactos econômicos;

- **Fase 3** – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros (novos sistemas fotovoltaicos).

A Figura 1 apresenta a sequência de desenvolvimento da presente pesquisa e a ligação das atividades em cada fase.

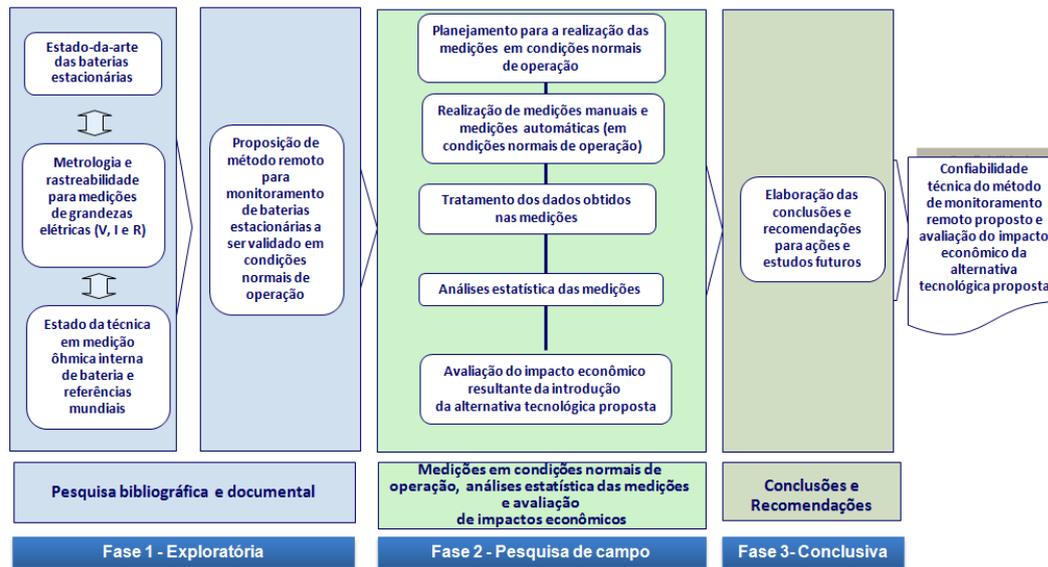


Figura 1 – Desenho da pesquisa

1.7. Estrutura da dissertação

A presente pesquisa está estruturada em cinco capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 1 (Introdução) caracteriza o problema objeto da dissertação, os objetivos, a metodologia utilizada, identifica a legislação aplicável e define os principais conceitos empregados. O capítulo 2 (estado-da-arte) fundamenta a base conceitual para o desenvolvimento da dissertação e apresenta o estado-da-arte sobre baterias estacionárias como fonte de energia auxiliar na subestação e os métodos de monitoramento de bateria comumente utilizados.

O capítulo 3 descreve as funcionalidades do equipamento de medição remota, a sua instalação e teste de campo.

O capítulo 4, (validação da medição remota em ambiente real de operação) refere-se ao cerne da dissertação. Aborda: (i) as medições laboratoriais de impedância e tensão elétrica com relação às medições em campo (ii) as análises estatísticas dos dados para determinar o nível de confiança com base no qual as condições de ensaio podem ser consideradas estatisticamente similares; (iii) o

processo de intercomparação com equipamentos de medição portátil de bateria. Este capítulo conceitua e valida o método remoto proposto para monitoramento de baterias estacionárias.

O capítulo 5 encaminha as conclusões, associando-as às questões originalmente formuladas e que refletem os objetivos do trabalho. Finalizando, propõe recomendações para desdobramentos futuros do trabalho.

2 Baterias estacionárias

As baterias estacionárias garantem a continuidade do fornecimento de energia numa eventual falha da rede elétrica para aplicações portáteis, sistemas de *backup* e sistemas de emergência.

Existem baterias do tipo pilhas, que podem fornecer energia de forma irreversível até a sua exaustão completa. E, também, baterias secundárias que asseguram o processo cíclico reversível de carga-descarga. Com base nesses preceitos, as baterias secundárias são as mais utilizadas em atividades industriais. Existem diferentes tipos de baterias, de acordo com sua natureza interna e da sua aplicação-alvo. Assim, quando se escolhe uma bateria, deve-se salientar que cada tipo de bateria oferece características e vantagens que justificam a sua escolha em relação a outras, mas nenhuma das baterias possui todos os requisitos de aplicação.

Os fabricantes de baterias estão cientes das necessidades de cada aplicação e, portanto, oferecem diferentes modelos de modo a assegurar a sua adequação a cada uso.

A primeira bateria foi constituída por Alessandro Volta, formada por apenas dois pedaços de metais distintos (zinco e prata) separados por um pedaço de papelão embebido em uma solução salina. Esta montagem foi denominada célula galvânica. A combinação de várias células iguais constitui uma bateria cuja potência é função do número de células conectadas em série. Em 20 de março de 1800, Volta comunicou sua invenção à Royal Society of London.

A invenção recém-criada de Alessandro Volta, a pilha, contribuiu para os avanços dos estudos sobre a decomposição elétrica e eletrólise da água, decomposição de sais, a exemplo do isolamento do sódio e do potássio, de seus hidróxidos. Em 1813, Michael Faraday pesquisou e elaborou diversas teorias que vieram a constituir os fundamentos da eletroquímica e do eletromagnetismo.

Em 1859, o físico francês Gaston Planté estudou a polarização entre dois eletrodos idênticos imersos em solução aquosa diluída de ácido sulfúrico. Planté investigou eletrodos de diferentes materiais (prata, chumbo, estanho, cobre, ouro, platina e alumínio). Resumiu os resultados de todas essas experiências em seu artigo intitulado: "*Recherches sur la polarisation voltaïque*", que foi publicado em Rendus na Academia Francesa de Ciências, em 1859. Em 26 de março de 1860, Gaston Planté demonstrou, na Academia Francesa de Ciências, as primeiras baterias chumbo-ácidas recarregáveis com nove células ligadas em paralelo e apresentou uma palestra intitulada "*Nouvelle pile secondaire d'une grande puissance*". Esta foi praticamente a certidão de nascimento da bateria chumbo-ácida.

Atualmente a bateria chumbo-ácida é fabricada e comercializada em todos os continentes, sendo a tecnologia mais utilizada para aplicações industriais.

2.1. Bateria chumbo-ácida: estado-da-arte

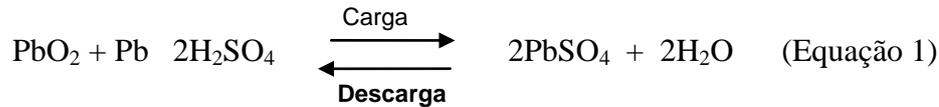
Comercialmente existem dois tipos de bateria chumbo-ácida estacionária, denominadas ventiladas e reguladas por válvula. As particularidades de cada tecnologia são descritas a seguir [13].

2.1.1. Bateria chumbo-ácida ventilada

A bateria chumbo-ácida é um sistema eletroquímico no qual os materiais ativos primordiais são: chumbo (e seus compostos) e eletrólito (uma solução aquosa de ácido sulfúrico). Qualquer que seja sua estrutura consiste, basicamente, de dois eletrodos, geralmente em forma de placas e isolados eletricamente; imersos em um eletrólito composto de uma solução aquosa de ácido sulfúrico e alojados em recipiente adequado.

A bateria chumbo-ácida ventilada é composta por placas positivas de peróxido de chumbo (PbO_2), placas negativas de chumbo metálico (Pb) esponjoso, que utiliza uma solução aquosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4) como eletrólito. Quando a bateria é descarregada, os materiais das placas positivas e

negativas se transformam em sulfato de chumbo (PbSO_4) e água (H_2O). A Equação 1 descreve a reação que resulta desse processo químico.

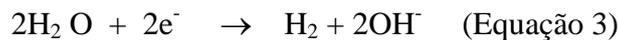


Quando a bateria chumbo-ácida é submetida a um processo de carga, além desta reação ocorre, paralelamente, no final da carga, outra reação que é conhecida como eletrólise da água. A eletrólise da água é a decomposição eletroquímica da água, gerando oxigênio gasoso (O_2) na superfície da placa positiva, e na placa negativa hidrogênio (H_2), também na forma gasosa (Equações 2 e 3).

Placa positiva:



Placa negativa:



Cabe ressaltar que nas aplicações estacionárias, nas quais a bateria opera em paralelo com o sistema de energia e com uma tensão elétrica de flutuação para manter suas placas carregadas, este processo de eletrólise da água também ocorre.

Os gases gerados durante o processo de carga, ou na operação da bateria em flutuação, arrastam vapores ácidos e consomem água do eletrólito. Assim, as baterias chumbo-ácidas ventiladas, utilizadas em aplicações estacionárias, devem ser instaladas em ambiente separado dos demais equipamentos eletrônicos. Por segurança a sala deve ser ventilada, pois quando um ambiente atinge um volume de 4% de hidrogênio na forma gasosa, mediante uma faísca ocorre explosão.

Durante sua operação há necessidade de adição de água destilada ou deionizada, devido à ocorrência da eletrólise da água. As baterias chumbo-ácidas ventiladas utilizam o eletrólito (ácido sulfúrico) na forma líquida, portanto seus elementos ou monoblocos têm que ser instalados em pé.

2.1.2. Bateria chumbo-ácida regulada por válvula

A bateria chumbo-ácida regulada por válvula (VRLA- *Valve Regulated Lead Acid*) possui a mesma composição da bateria ventilada, no entanto o ácido sulfúrico (eletrólito) não se encontra na forma líquida, mantido imobilizado por uma matriz gelificante ou por meio de separador a base de microfibras de vidro.

As baterias reguladas por válvula (acumuladores do tipo chumbo-ácido) apresentam o mesmo princípio de funcionamento das baterias ventiladas. Princípio esse baseado na teoria do sulfato duplo indicando, em essência, que durante o processo de descarga ocorre a formação de sulfato de chumbo em ambas as placas. Este processo é descrito pela equação 1.

Similarmente ao que ocorre com a bateria ventilada, algumas reações indesejáveis (simultâneas à reação principal) também ocorrem na bateria VRLA, a exemplo do processo de eletrólise da água, que provoca a evolução de oxigênio e hidrogênio nas superfícies das placas positiva e negativa. No entanto, a imobilização do eletrólito na bateria VRLA faz com que haja um processo de recombinação interna, no qual o oxigênio gerado na superfície da placa positiva migra até a superfície da placa negativa, reagindo com o chumbo e gerando água como produto final de reação. Este fenômeno é descrito pela equação (4), a seguir:



O ciclo do oxigênio, além de consumir o oxigênio gerado internamente, diminui sensivelmente a evolução do hidrogênio, como descrito na equação 4.

Os acumuladores regulados por válvula em condições normais de operação e com tensão elétrica de flutuação produzem aproximadamente hidrogênio na taxa de 1 a 2 ml de H₂ por hora para cada 100 Ah de capacidade da bateria. Todavia, os acumuladores ventilados produzem em torno de 5 a 14 ml de H₂ por hora para cada 100 Ah de capacidade da bateria.

Como não é possível obter um ciclo de hidrogênio, similar ao do oxigênio, a perda deste gás significa perda de água da bateria. Esta perda é intensificada sob condições desfavoráveis de operação. Desta forma não é recomendado o uso deste tipo de baterias em ambientes herméticos, sob risco de ocorrência de explosões.

A bateria regulada por válvula não necessita de reposição de água, e pode coexistir no mesmo ambiente de outros equipamentos eletrônicos, uma vez que a liberação de gás gerado (99% é hidrogênio) é cerca de 10 vezes menor que numa bateria ventilada. Além disso, não há o arraste de vapores ácidos, uma vez que este está imobilizado e também pode ser instalada em pé ou deitada.

A temperatura do elemento ou monobloco da bateria VRLA é o valor de temperatura obtida na superfície externa do elemento ou monobloco (na lateral do vaso ou na superfície do polo negativo), pela impossibilidade de acesso ao seu interior.

Nas baterias VRLA, esta temperatura é ligeiramente maior que nas baterias ventiladas. Isto ocorre porque nas baterias ventiladas a corrente de flutuação é utilizada na compensação da auto-descarga e na eletrólise da água. Entretanto, nas baterias VRLA a corrente de flutuação é quase que completamente utilizada pelo ciclo do oxigênio, o qual converte energia elétrica em calor, provocando desta forma o aumento na temperatura dos elementos ou monoblocos.

A expectativa de vida das baterias VRLA está diretamente associada à temperatura dos seus elementos ou monoblocos. Um artifício utilizado para diminuir o efeito da temperatura na expectativa da vida útil das baterias VRLA é efetuar a compensação da tensão elétrica de flutuação. Com isto, nas baterias que têm que operar em temperaturas acima de 25°C, utiliza-se uma correção na tensão elétrica de flutuação, em função da temperatura de operação, conforme recomendado pelo fabricante da bateria.

Todavia, mesmo com essa compensação da tensão elétrica de flutuação, não se pode esperar a manutenção da mesma expectativa de vida nas condições de referência (25°C). A Tabela 1 apresenta uma relação típica da vida útil projetada em função da temperatura.

Tabela 1 – Expectativa de vida útil das baterias chumbo-ácida VRLA

Temperatura (°C)	Expectativa de Vida Útil (anos)	
	Sem Compensação	Com Compensação
25	10	10
30	7,0	9,5
35	5,0	8,0
40	3,5	6,0
45	2,5	4,0

Fonte: Handbook of Battery Technology, 3rd edition, 2003.

É importante enfatizar que a compensação da tensão elétrica de flutuação em função da temperatura é fundamental para impedir um processo de aumento gradual da temperatura denominado *Avalanche Térmica* ("*Thermal Runaway*"). Este é um processo definido pelo aumento contínuo da temperatura e da corrente de carga da bateria, sem que seja alcançada uma condição de estabilidade, até sua destruição.

As baterias chumbo-ácidas reguladas por válvula são particularmente sujeitas ao processo de avalanche térmica, sobretudo quando operando com equipamentos que não dispõem de mecanismos para correção automática da tensão elétrica de flutuação, em função da temperatura.

O ciclo de recombinação de oxigênio, que propicia as características desejáveis para o funcionamento destes acumuladores, é também a fonte potencial de sua morte prematura e algumas vezes desastrosa.

Para evitar os efeitos da avalanche térmica, os elementos ou baterias devem ser acomodados de forma a proporcionar ventilação suficiente para dissipar o calor gerado quando em operação. O fabricante deve apresentar tabelas ou curvas que indiquem as condições de temperatura, tensão elétrica e corrente de flutuação limites para evitar a avalanche térmica. No caso da temperatura subir além do limite de segurança recomendado pelo fabricante, deve haver um dispositivo de proteção da bateria, incluído nas fontes de corrente contínua, que mantém a bateria carregada em flutuação.

2.2.

Bateria: fonte auxiliar de energia na subestação

As baterias são elementos vitais na confiabilidade de uma subestação, pois é por meio destas que toda a supervisão e pontos de controles mantêm seu funcionamento numa falha de energia. A bateria opera em paralelo com o sistema retificador e é mantida na tensão elétrica de flutuação (para evitar a autodescarga de suas placas). Somente será acionada na ocorrência de uma falta da energia comercial. Esta aplicação é denominada estacionária, pois suas instalações são fixas, ou seja, não são trocados regularmente de local.

De acordo com a Resolução Anatel 570 e 597, as baterias chumbo-ácidas estacionárias, em função do regime de descarga, são classificados como:

- **Alta Intensidade de Descarga:** corresponde a tempos de descarga iguais ou menores que 1 hora, aplicados aos sistemas de energia em corrente alternada ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* - UPS) e aos sistemas de partida de grupos geradores, sendo definida para regime de descarga de 0,25 h (15 min.) até a tensão elétrica final de 1,60 V, à temperatura de referência de 25°C;
- **Média Intensidade de Descarga:** corresponde a tempos de descarga maiores que 1 hora até 20 horas, aplicados aos sistemas de energia em corrente contínua, e devem atender as capacidades de 50 Ah a 3.000 Ah para regime de descarga de 10h até a tensão elétrica final de 1,75 V, à temperatura de referência de 25°C;
- **Baixa Intensidade de Descarga:** corresponde a tempos de descarga maiores que 20 horas, para regime de descarga de 120 h até a tensão elétrica final de 1,85 V, à temperatura de referência de 25°C.

Nestes sistemas, as tensões nominais geralmente são de 125V. No Brasil, a grande maioria das subestações utilizam baterias chumbo-ácidas ventiladas ou reguladas por válvula de média intensidade de descarga. Geralmente a bateria é dimensionada para garantir ao sistema uma autonomia de 10 horas.

Independente da tecnologia da bateria, quando esta permanece em circuito aberto (parada sem conexão a fonte externa) sofre reações internas que provocam a autodescarga de suas placas, com conseqüente diminuição de sua autonomia. Para evitar esta perda, nas aplicações estacionárias as baterias devem ser mantidas em uma tensão elétrica um pouco superior a sua tensão elétrica de circuito aberto.

Esta tensão elétrica é conhecida como tensão elétrica de flutuação, cujo valor é indicado pelo fabricante.

Nas subestações de energia elétrica, seja nos serviços auxiliares ou no sistema de telecomunicações, as baterias trabalham em regime de flutuação, sendo conectadas em paralelo com o sistema de alimentação principal, conforme apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Sistema de baterias estacionárias

Fonte: <http://www.ingeo-electronica.com.ar/baterias.htm>

2.3. Bateria: métodos de avaliação de desempenho

O método proposto de avaliação de desempenho de baterias estacionárias encontra-se em conformidade às normas ABNT e Resoluções Anatel discutidas no item 1.1.3. Ou seja, as baterias chumbo-ácidas ventiladas ou reguladas por válvula (utilizadas em subestações de energia elétrica) devem apresentar uma vida útil projetada superior a dez anos, em regime de flutuação a uma temperatura de operação de 25°C.

Para que a bateria consiga atingir, no mínimo, o valor estimado de sua vida útil é primordial que sejam realizadas manutenções periódicas, preventivas e corretivas.

Os parâmetros comumente avaliados são:

- **Inspeção visual:** a inspeção visual tem como objetivo avaliar se os aspectos construtivos das baterias estão de acordo com o especificado no manual do fabricante e não apresentam anomalias. Para isso, são verificados: corrosões dos pólos, parafusos, abaulamento, etc. As baterias chumbo-ácidas ventiladas possuem o vaso transparente, o que facilita a visualização interna dos componentes da bateria.
- **Medida de densidade:** este ensaio só é aplicável para a bateria ventilada, pois a bateria VRLA possui o eletrólito imobilizado, não sendo possível a medição deste parâmetro. No caso das baterias chumbo-ácidas, o eletrólito além de ser o agente condutor, ele também é um material ativo e participa das reações de carga e descarga da bateria. A densidade do eletrólito é um indicativo do estado de carga da bateria. Segundo Norma ABNT NBR 14197 e Resolução Anatel 597, o valor da densidade da bateria de média intensidade de descarga deve ser de $1,210 \text{ g/cm}^3 \pm 10 \text{ g/cm}^3$.
- **Nível do eletrólito:** este parâmetro só é aplicável à bateria ventilada. Durante a operação da bateria na tensão elétrica de flutuação, o nível do eletrólito vai diminuindo devido à ocorrência da reação paralela de decomposição da água (gera como subprodutos o hidrogênio e oxigênio gasoso, que é expelido ao ambiente). Periodicamente para que o nível esteja adequado, deve-se realizar reposição de água destilada ou deionizada.
- **Tensão elétrica de flutuação:** segundo normas ABNT NBR 14197 e ABNT NBR 14204 a tensão elétrica de flutuação tanto da bateria ventilada como VRLA pode apresentar uma variação máxima de $-0,05 \text{ V}$ e $+0,10 \text{ V}$ por elemento. Tensão elétrica inferior a esta faixa pode provocar a sulfatação das placas positivas e negativas. Por outro lado, tensão elétrica superior provocará a corrosão da placa positiva. Ambos os eventos provocam a aceleração da degradação da bateria e diminuição de sua vida útil. Desta forma é indicado o acompanhamento periódico deste parâmetro.
- **Temperatura:** outro parâmetro muito importante a ser avaliado na bateria é a sua temperatura, pois pode ser um indicativo de problemas de degradação interna, tais como corrosão, avalanche térmica, etc. Na bateria ventilada é possível medir a temperatura do eletrólito, já na bateria VRLA a temperatura é medida no vaso ou tampa do elemento. Todos os parâmetros descritos anteriormente são realizados com a bateria em operação, isto é na condição de flutuação, que não requer a necessidade de a bateria ser retirada de operação.
- **Ensaio de capacidade:** o ensaio de capacidade é utilizado para determinar a capacidade real da bateria e sua quantidade de energia disponível. Este ensaio ao contrário dos demais itens listados anteriormente é invasivo e tem que ser realizado com a bateria fora de operação. Sua realização numa situação real de operação é difícil e complicada, pois necessita de acompanhamento constante de um profissional qualificado e também, pode colocar o sistema em risco, pois durante a sua execução, caso haja uma falta de energia comercial, o sistema de backup não atuará. Atualmente não é muito utilizado. Neste

ensaio a bateria é submetida a uma descarga com corrente constante durante um determinado tempo. Após a bateria ser desconectada do sistema de energia da Subestação, seus pólos terminais positivos e negativos são conectados a uma carga resistiva onde drenará a corrente para descarregar a bateria. Durante a descarga, a tensão elétrica individual de cada elemento é acompanhada, e o teste é finalizado quando um dos elementos atingir o valor de 1,75V, que é conhecido como instante final de descarga. A capacidade real da bateria é calculada segundo equação 5:

$$Cr = i \times t \quad (\text{Equação 5})$$

Cr = capacidade da bateria

i = corrente utilizada na descarga (A)

t = tempo decorrido desde o início do ensaio até o instante final de descarga (h)

A Figura 3 mostra um perfil típico de descarga. Geralmente a bateria é descarregada num regime de descarga de 3 ou 5 horas. Após o término da descarga, a bateria deverá ser recarregada (em torno de 14 a 20 horas), para posteriormente ser inserida novamente no sistema de backup da Subestação.

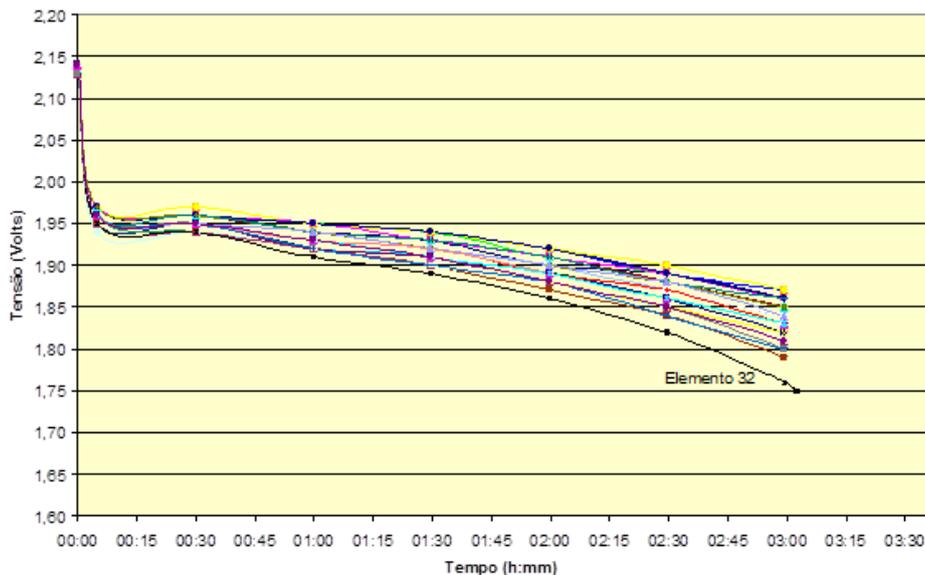


Figura 3 – Curva de descarga de uma bateria chumbo-ácida ventilada

Fonte: Relatório técnico Ligth [3]

Medição de resistência interna (impedância, condutância, resistência): Um sistema elétrico ou eletroquímico, quando atravessado por um fluxo de corrente elétrica, apresenta resistência ou impedância a esse fluxo. Assim o valor absoluto da impedância, condutância ou resistência interna da bateria é uma função da integridade de seus componentes internos, tais como: polos, grades, conexões internas, placas, separadores e eletrólito. A bateria nova apresenta uma determinada resistência interna. No decorrer do seu uso, seus componentes internos sofrerão processos de degradação, que será

refletido numa variação de sua resistência interna. Esta variação poderá ser detectada pelas medições de condutância ou impedância ou resistência interna. As medidas de impedância ou condutância ou resistência interna, quando realizadas periodicamente, podem ser usadas para acompanhar o processo de degradação da bateria. Obtendo-se dados suficientes, pode ser feita uma projeção da vida útil remanescente da bateria [16-17]. No mercado existem vários equipamentos portáteis para realizar estas medições. A resistência interna pode ser medida através de condutância, impedância e resistência em corrente contínua. Cada equipamento portátil realiza a medição de uma maneira específica. Vários estudos realizados mundialmente e no Brasil comprovaram que estas medições são eficazes como ferramenta para acompanhamento do estado de degradação da bateria. As medidas de impedância, condutância ou resistência interna devem ser realizadas com a bateria em flutuação. Cada elemento é medido individualmente. O equipamento mede também a tensão elétrica de flutuação. Na primeira avaliação, com a bateria nova, calcula-se o valor médio de impedância, condutância ou resistência interna para cada bateria. A partir desta, nas demais avaliações este valor será considerado como sendo o valor de referência. Para a avaliação da impedância e resistência interna são consideradas as seguintes regras:

- Os elementos que apresentarem valores de impedância ou resistência interna inferior a 20% do valor de referência são considerados em estado normal para operação;
- Os elementos que apresentarem valores de impedância ou resistência interna superior a 20% do valor de referência, são considerados em estado de alerta;
- Os elementos que apresentarem valores de impedância superior a 50% do valor de referência indicam que estão em processo de degradação avançada e devem ser substituídos.

Para a avaliação da condutância são consideradas as seguintes regras:

- Os elementos que apresentarem valores superiores a 80% do valor de referência são considerados em estado normal para operação;
- Os elementos que apresentarem valores de condutância no intervalo de 60 a 80% inferiores ao Valor de Referência representam um sinal de alerta, indicando que a bateria está com algum problema;
- Os elementos que apresentarem valores de condutância 40% inferior ao Valor Referência devem ser substituídos imediatamente.

Os Valores de Referência devem ser obtidos 90 dias após a instalação do banco, pois antes desse período a bateria não está totalmente ativada e os materiais ativos de suas placas positivas e negativas não estão totalmente formados.

3 Monitoramento remoto de baterias

O monitoramento remoto de baterias otimiza os recursos financeiros com os processos de manutenção e operação das subestações, bem como agrega valor a confiabilidade do sistema. No mercado nacional, as opções de equipamentos para o monitoramento remoto de bateria são restritas e pouco difundidas. Tais fatos colaboraram para o desenvolvimento de um protótipo para o monitoramento remoto de baterias, tal qual ocorre no âmbito de um projeto de pesquisa e desenvolvimento [11].

3.1. Funcionalidades do protótipo

A Figura 4 mostra a arquitetura do protótipo do sistema de monitoramento remoto. O hardware é composto por Unidades de Medição (UM) e uma Unidade de Controle (UC). Uma UM mede a tensão elétrica, nível de eletrólito (somente baterias ventiladas) e impedância individual de até quatro elementos, como também a temperatura ambiente de um elemento, resistência de interconexão e corrente de *ripple*.

Essas medições são transmitidas via comunicação sem fio (*wireless*) para a UC, que armazena e processa os dados e envia via rede GSM para um Servidor. Os dados são processados e analisados pelo Software de Gestão de Baterias. O sistema também monitora a bateria quando esta entra em descarga (falta da energia comercial). O protótipo mede o valor ôhmico por meio da técnica de impedância, a qual utiliza corrente alternada e tensão elétrica em uma frequência conhecida. As Figuras 5 e 6, respectivamente, mostram a Unidade de Medição e a Unidade de Controle desenvolvidas. Além disso, a Figura 7 apresenta o sistema de baterias estacionárias instalado na subestação Baependi.

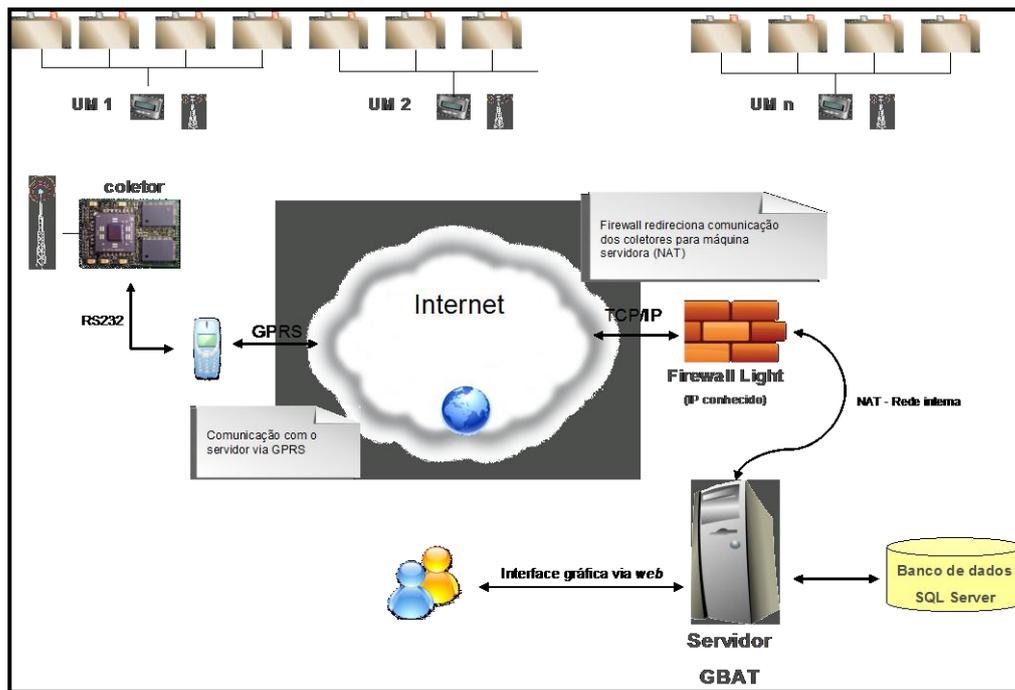


Figura 4 – Arquitetura do sistema de monitoramento remoto

3.2. Definição dos parâmetros monitoráveis

Tensão elétrica e impedância são os parâmetros monitoráveis que foram discutidos e avaliados para verificar a confiabilidade do equipamento remoto.

3.3. Instalação e teste de campo

Os protótipos foram instalados na Subestação da Light Baependi, em operação na cidade do Rio de Janeiro. Esta Subestação possui dois bancos de baterias chumbo-ácidas ventiladas compostas por 60 elementos cada, tendo sido instalado em um dos bancos. O protótipo é composto por 15 Unidades de Medição (UM) e uma Unidade de Controle (UC). A Figura 6 apresenta a UC do protótipo.

O equipamento proporciona a funcionalidade de programação das medições de acordo com a necessidade do usuário. Entretanto, para este estudo as medições foram realizadas com periodicidade semanal.



Figura 5 – Unidade de Medida do protótipo do sistema



Figura 6 – Unidade de Controle do protótipo do sistema



Figura 7 – Sistema de baterias estacionárias localizado na subestação Baependi

4

Validação da medição remota em ambiente real de operação: Procedimentos experimentais e resultados

Serão abordados neste capítulo os procedimentos adotados para a validação das medições de impedância e tensão elétrica geradas pelo protótipo em ambiente real de operação.

4.1.

Procedimentos de ensaio para validação das medições

Para realizar a validação das medições de tensão elétrica e impedância do protótipo de monitoramento remoto foi utilizado um equipamento portátil com capacidade e resolução metrológica compatível com as medições alvo.

O equipamento portátil utilizado foi o modelo EC 2000, fabricado pela World Energy Labs, o qual utiliza metodologia de medição a 4 fios para realizar as medições ôhmicas internas da bateria.

As medições foram realizadas em intervalos regulares (semanais) durante dois meses. Foi medida a tensão elétrica e a impedância de cada elemento que compõe o grupo de baterias no qual o protótipo está instalado, totalizando 60 medições por ensaio. Conforme instrução de operação do instrumento, estas medições foram realizadas com a bateria na condição de flutuação. Visando realizar a análise comparativa dos dados de impedância e de tensão elétrica do equipamento portátil em relação às medições efetuadas pelo protótipo, para cada medição realizada com o equipamento portátil foi solicitado ao sistema de monitoramento remoto a realização de medições destas duas grandezas.

4.2.

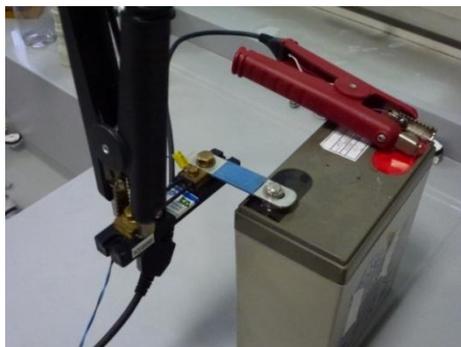
Calibração do equipamento portátil

Para assegurar a confiabilidade das medições do equipamento portátil, inicialmente foi realizada uma verificação preliminar de sua calibração. Os

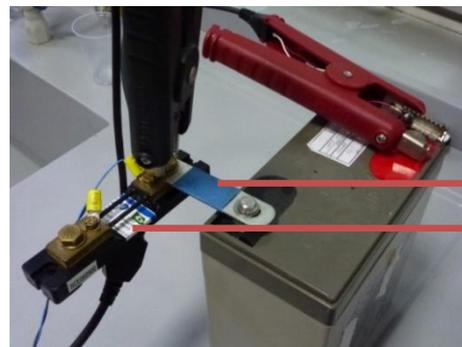
equipamentos portáteis possuem dispositivo interno de ajuste automático, não sendo possível realizar qualquer tipo de intervenção em suas rotinas de medição.

Desta forma, a verificação da calibração do equipamento portátil foi conduzida conforme descrito a seguir:

Um elemento de bateria VRLA de 150 Ah foi interligado com um *strap*¹, por meio de seu polo negativo, ligado em série com um *shunt*² de 60 A / 60 mV devidamente calibrado e referenciado a um certificado de calibração (número PD.SM.11.22A.3986A/CC-01-AA, no Anexo 1), emitido pelo laboratório Fundação CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações). Uma das ponteiros de medição do equipamento portátil foi conectada ao polo positivo da bateria e a outra ponteira na extremidade livre do *shunt*, realizando uma medição com o equipamento portátil do conjunto elemento + *strap* + *shunt*. Em seguida outras medições foram realizadas somente com elemento + *strap*, isto é, sem o *shunt*, e finalmente apenas com o elemento. A Figura 8a e 8b ilustram a realização do ensaio e a Figura 8c apresenta os resultados das medições.



A – Conjunto elemento + *strap* + *shunt*



B – Conjunto elemento + *strap*

#	Tested	IMP(mC)
1		0.550
2		0.550
3		0.593
4		0.594
5		1.605
6		1.605

C – Resultado das medições

Figura 8 – Ensaio para validação das medições

¹ *Strap*: Barra de conexão entre os elementos

² *Shunt*: Dispositivo utilizado para medir corrente contínua que circula em um determinado circuito. É fundamental para determinar com maior precisão a corrente que circula em um arranjo.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos nas medições de resistência elétrica e os resultados das diferenças ôhmicas entre o conjunto elemento + strap + *shunt* e o conjunto elemento + strap, assim definindo um procedimento de cálculo que resulta no valor medido do *shunt*. As medições foram realizadas em duplicidade.

Comparando este valor medido do *shunt* com o seu valor de calibração (1,000 mOhm) foram obtidos os desvios mostrados na tabela, demonstrando que as medições obtidas com o equipamento portátil são confiáveis.

Tabela 2 – Valores obtidos nas medições de resistência elétrica

Número de medições	Elemento + <i>strap</i> + <i>shunt</i> (mOhm)	Elemento + <i>strap</i> (mOhm)	Elemento (mOhm)	Valor calibrado do <i>shunt</i> (S_{cal}) (mOhm)	Valor medido do <i>shunt</i> ($S_{med} = (E+S+S) - (E+S)$) (mOhm)	Desvio ($(S_{med} - S_{cal}) / (S_{cal})$) (%)
1	1,605	0,593	0,550	1,000	1,012	1,20
2	1,605	0,594	0,550	1,000	1,011	1,10

4.3. Análises estatísticas dos dados

A validação da medição remota em ambiente real de operação foi avaliada mediante testes estatísticos, paramétricos e não paramétricos, referenciados aos níveis de confiança 90%, 95% e 99%. As medições das duas amostras foram realizadas em temperatura ambiente de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 20\%$.

A confiabilidade das medições foi avaliada por meio do Teste de Significância para a igualdade de duas médias, utilizando o procedimento descrito por Jairo Simon da Fonseca e Gilberto de Andrade Martins [18]. O teste de significância para a igualdade de duas médias considera as populações normais e independentes. Além disso, um caso particular deste teste assume as variâncias populacionais desconhecidas e admitidas iguais.

Inicialmente, para a realização da análise estatística da medição de impedância e tensão elétrica, os dados das Medidas 1 (Medições SIMBA-GEBAT) e das Medidas 2 (equipamento portátil de medição) foram testados com base no teste de hipóteses Kolmogorov-Smirnov (K-S) para verificar sua conformidade à distribuição normal de probabilidade. O teste K-S é um teste não paramétrico que verifica a concordância entre distribuições acumuladas dos valores observados da amostra contra a correspondente distribuição acumulada

especificada (teórica). Para o caso específico desta dissertação, a distribuição teórica está associada a uma distribuição normal de probabilidade.

Visando à garantia da confiabilidade do resultado do teste de significância para a igualdade de duas médias, após a aplicação do teste K-S foi utilizado o teste de significância para a igualdade de duas variâncias [18]. Para as medições da impedância e tensão elétrica, foi verificado se as variâncias populacionais das amostras podem ser consideradas estatisticamente iguais aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%. A independência entre as duas amostras testadas foi qualitativamente definida, sendo apresentada na seção 4.3.1.3. Por último, aplica-se o teste de significância para a igualdade de duas médias, validando as medições de impedância e as medições da tensão elétrica feitas pelo sistema SIMBA-GEBAT, aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

4.3.1.

Análise estatística da medição de impedância

A Tabela 3 apresenta os dados das Medidas 1 das medições de impedância de sessenta elementos de baterias do sistema SIMBA-GEBAT. A Tabela 4 apresenta os dados das Medidas 2, do equipamento portátil de medição.

Tabela 3 – Medições de Impedância SIMBA-GEBAT (Medidas 1)

Medições SIMBA-GEBAT (mOhms)													
Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12	Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12
1	0,827	0,816	0,819	0,803	0,809	0,814	31	0,759	0,768	0,741	0,744	0,742	0,750
2	0,788	0,781	0,774	0,772	0,768	0,788	32	0,750	0,751	0,737	0,734	0,735	0,746
3	0,773	0,785	0,777	0,769	0,766	0,780	33	0,740	0,723	0,708	0,714	0,711	0,714
4	0,760	0,744	0,738	0,731	0,736	0,758	34	0,721	0,710	0,696	0,703	0,704	0,709
5	0,804	0,772	0,777	0,790	0,790	0,782	35	0,681	0,776	0,783	0,799	0,770	0,770
6	0,785	0,749	0,777	0,761	0,761	0,757	36	0,721	0,702	0,690	0,693	0,691	0,710
7	0,758	0,741	0,743	0,726	0,726	0,725	37	0,718	0,735	0,769	0,766	0,773	0,764
8	0,727	0,810	0,790	0,795	0,796	0,796	38	0,783	0,745	0,756	0,729	0,732	0,765
9	0,783	0,779	0,783	0,777	0,776	0,799	39	0,672	0,782	0,786	0,784	0,795	0,795
10	0,804	0,862	0,845	0,879	0,834	0,834	40	0,691	0,774	0,751	0,751	0,750	0,750
11	0,753	0,709	0,735	0,732	0,726	0,758	41	0,761	0,759	0,767	0,751	0,754	0,776
12	0,711	0,717	0,701	0,700	0,704	0,714	42	0,703	0,810	0,796	0,801	0,797	0,797
13	0,740	0,797	0,779	0,793	0,796	0,796	43	0,688	0,687	0,684	0,685	0,686	0,696
14	0,713	0,775	0,770	0,773	0,784	0,784	44	0,710	0,834	0,805	0,829	0,819	0,819
15	0,704	0,786	0,753	0,762	0,754	0,754	45	0,668	0,655	0,649	0,652	0,657	0,656
16	0,764	0,829	0,814	0,825	0,803	0,803	46	0,676	0,761	0,747	0,752	0,749	0,749
17	0,787	0,779	0,775	0,769	0,772	0,775	47	0,717	0,715	0,704	0,710	0,711	0,720
18	0,726	0,718	0,738	0,720	0,728	0,724	48	0,713	0,778	0,758	0,766	0,767	0,767
19	0,778	0,840	0,817	0,841	0,816	0,816	49	0,659	0,729	0,719	0,717	0,722	0,722
20	0,757	0,742	0,741	0,738	0,734	0,751	50	0,696	0,815	0,827	0,810	0,790	0,790
21	0,768	0,743	0,710	0,709	0,710	0,711	51	0,678	0,666	0,673	0,666	0,667	0,677
22	0,764	0,780	0,719	0,721	0,720	0,725	52	0,663	0,729	0,731	0,737	0,702	0,702
23	0,740	0,731	0,697	0,692	0,698	0,706	53	0,657	0,647	0,657	0,666	0,663	0,671
24	0,699	0,770	0,768	0,783	0,756	0,756	54	0,621	0,742	0,732	0,740	0,728	0,728
25	0,731	0,711	0,725	0,717	0,724	0,735	55	0,631	0,623	0,627	0,625	0,625	0,631
26	0,753	0,753	0,745	0,719	0,716	0,754	56	0,618	0,604	0,611	0,593	0,596	0,622
27	0,697	0,701	0,695	0,669	0,671	0,671	57	0,677	0,769	0,719	0,748	0,736	0,736
28	0,687	0,776	0,740	0,758	0,761	0,761	58	0,648	0,645	0,640	0,642	0,647	0,667
29	0,756	0,742	0,751	0,758	0,758	0,767	59	0,656	0,653	0,651	0,649	0,652	0,677
30	0,805	0,853	0,832	0,871	0,855	0,855	60	0,665	0,708	0,736	0,709	0,709	0,725

Tabela 4 – Medições de Impedância do Equipamento Portátil (Medidas 2)

Medições Equipamento Portátil (mOhms)													
Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12	Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12
1	0,832	0,827	0,825	0,820	0,820	0,839	31	0,800	0,761	0,797	0,781	0,781	0,806
2	0,799	0,778	0,804	0,772	0,772	0,816	32	0,780	0,751	0,756	0,760	0,760	0,771
3	0,771	0,780	0,763	0,767	0,767	0,774	33	0,791	0,782	0,774	0,750	0,750	0,788
4	0,787	0,757	0,771	0,763	0,763	0,782	34	0,790	0,750	0,770	0,764	0,764	0,765
5	0,796	0,763	0,772	0,783	0,783	0,791	35	0,726	0,733	0,749	0,720	0,720	0,747
6	0,772	0,739	0,766	0,748	0,748	0,763	36	0,789	0,758	0,764	0,771	0,771	0,772
7	0,779	0,770	0,771	0,757	0,757	0,761	37	0,780	0,758	0,787	0,782	0,782	0,782
8	0,760	0,740	0,745	0,746	0,746	0,777	38	0,775	0,760	0,787	0,764	0,764	0,798
9	0,779	0,778	0,787	0,769	0,769	0,799	39	0,732	0,736	0,734	0,745	0,745	0,746
10	0,812	0,795	0,829	0,784	0,784	0,833	40	0,724	0,701	0,701	0,700	0,700	0,726
11	0,772	0,730	0,760	0,751	0,751	0,783	41	0,759	0,758	0,758	0,747	0,747	0,778
12	0,771	0,735	0,750	0,739	0,739	0,754	42	0,780	0,766	0,771	0,767	0,767	0,771
13	0,747	0,729	0,743	0,746	0,746	0,757	43	0,763	0,747	0,763	0,761	0,761	0,760
14	0,725	0,720	0,723	0,734	0,734	0,740	44	0,784	0,755	0,779	0,769	0,769	0,789
15	0,756	0,723	0,732	0,724	0,724	0,750	45	0,717	0,693	0,716	0,702	0,702	0,714
16	0,779	0,764	0,775	0,753	0,753	0,782	46	0,711	0,697	0,702	0,699	0,699	0,707
17	0,777	0,764	0,785	0,769	0,769	0,795	47	0,756	0,752	0,727	0,732	0,732	0,751
18	0,747	0,748	0,773	0,757	0,757	0,754	48	0,708	0,688	0,696	0,697	0,697	0,725
19	0,810	0,787	0,811	0,786	0,786	0,818	49	0,679	0,669	0,667	0,672	0,672	0,694
20	0,802	0,790	0,791	0,785	0,785	0,796	50	0,715	0,727	0,710	0,690	0,690	0,720
21	0,777	0,745	0,752	0,739	0,739	0,754	51	0,697	0,675	0,676	0,681	0,681	0,681
22	0,781	0,776	0,765	0,758	0,758	0,765	52	0,679	0,681	0,687	0,702	0,702	0,685
23	0,760	0,745	0,733	0,743	0,743	0,747	53	0,672	0,657	0,672	0,669	0,669	0,684
24	0,740	0,738	0,753	0,726	0,726	0,745	54	0,692	0,682	0,690	0,678	0,678	0,707
25	0,728	0,705	0,733	0,716	0,716	0,742	55	0,702	0,693	0,697	0,696	0,696	0,707
26	0,761	0,743	0,765	0,736	0,736	0,784	56	0,694	0,664	0,690	0,678	0,678	0,697
27	0,706	0,696	0,702	0,699	0,699	0,710	57	0,719	0,669	0,698	0,686	0,686	0,707
28	0,726	0,690	0,708	0,711	0,711	0,731	58	0,692	0,673	0,689	0,680	0,680	0,704
29	0,787	0,756	0,772	0,774	0,774	0,782	59	0,661	0,664	0,674	0,667	0,667	0,672
30	0,803	0,782	0,821	0,805	0,805	0,822	60	0,698	0,698	0,726	0,699	0,699	0,725

4.3.1.1.

Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S)

O teste K-S foi utilizado para testar se os dados apresentados nas Tabelas 3 e 4 seguem uma distribuição normal de probabilidade. Inicialmente foram feitas inferências estatísticas que forneceram uma ideia preliminar acerca da distribuição de probabilidades que segue as amostras estudadas.

Em primeiro lugar foram tratados os dados das Medidas 1 – Medições de Impedância SIMBA-GEBAT.

A Tabela 5, apresenta a estatística descritiva, a qual forneceu valores próximos da média, mediana e moda, o que permite inferir que a amostra segue uma distribuição normal de probabilidade com média μ e variância σ^2 . Além disso, a Tabela 6 apresenta a frequência absoluta em cada intervalo de classe. Pode-se observar na figura 9, o histograma da amostra, o qual apresenta um sino com perfil similar ao de uma distribuição normal.

Tabela 5 – Estatística descritiva

<i>Estatística Descritiva</i>	<i>Valor</i>
Média	0,740 mOhm
Erro padrão	0,003 mOhm
Mediana	0,743 mOhm
Moda	0,710 mOhm
Desvio padrão	0,053 mOhm
Variância da amostra	0,002 mOhm ²
Curtose	-0,067
Assimetria	-0,245
Intervalo	0,286 mOhm
Valor mínimo	0,593 mOhm
Valor máximo	0,879 mOhm
Soma	266,338 mOhm
Contagem	360

Tabela 6 – Intervalo do histograma

<i>Bloco (mOhm)</i>	<i>Frequência</i>
0,593	1
0,622	5
0,650	15
0,679	31
0,707	33
0,736	77
0,765	75
0,793	70
0,822	35
0,851	12
0,880	6

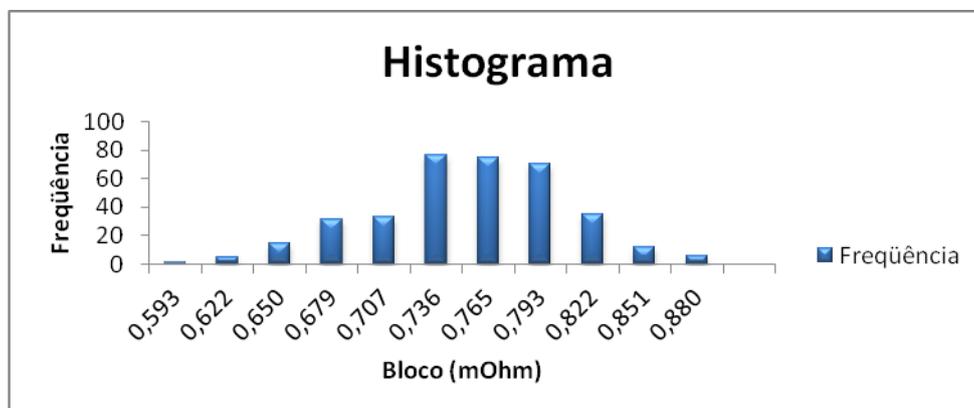


Figura 9 – Histograma de frequência: medições de impedância SIMBA-GEBAT

Foram calculados os seguintes estimadores dos parâmetros desta amostra:

Medidas 1 ~ N (μ, σ^2)

$$\bar{x}_1 = 0,740$$

$$s_1^2 = 0,002$$

A seguir foi aplicado o teste K-S para determinar se a medidas 1 segue uma distribuição normal de probabilidade com os estimadores dos parâmetros calculados aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%:

- **Hipótese:**

H_0 = As medições das medidas 1 seguem uma distribuição normal de probabilidade

H_1 = As medições das medidas 1 não seguem uma distribuição normal de probabilidade

Tabela 7 – Tabela de frequência absoluta

No	Intervalo (mOhm)		Frequência absoluta	Frequência acumulada
1	0,593	0,622	6	6
2	0,622	0,650	15	21
3	0,650	0,679	31	52
4	0,679	0,707	33	85
5	0,707	0,736	77	162
6	0,736	0,765	75	237
7	0,765	0,793	70	307
8	0,793	0,822	35	342
9	0,822	0,851	12	354
10	0,851	0,880	6	360

A seguir, os dados das medidas 1 foram padronizados em uma distribuição normal de probabilidades com $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$, permitindo calcular as frequências esperadas ou teóricas. Assim os valores de $Z \sim N(0,1)$ [Anexo 6] são obtidos pela seguinte equação (6):

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (\text{Equação 6})$$

Nessa equação,

X = valor do intervalo da Tabela 7

$$\mu = 0,740$$

$$\sigma = 0,053$$

Distribuição normal de probabilidade com média zero e variância um

Tabela 8 – Cálculo da frequência esperada

No	Intervalo (mOhm)		Intervalo Z		Área do Intervalo Z		Área em Z	e _i	f _i
1	0,593	0,622	-2,7750	-2,2340	0,0028	0,0127	0,0100	3,6	6
2	0,622	0,650	-2,2340	-1,6930	0,0127	0,0452	0,0325	11,7	15
3	0,650	0,679	-1,6930	-1,1520	0,0452	0,1247	0,0794	28,6	31
4	0,679	0,707	-1,1520	-0,6110	0,1247	0,2706	0,1459	52,5	33
5	0,707	0,736	-0,6110	-0,0699	0,2706	0,4721	0,2015	72,5	77
6	0,736	0,765	-0,0699	0,4711	0,4721	0,6812	0,2091	75,3	75
7	0,765	0,793	0,4711	1,0121	0,6812	0,8443	0,1630	58,7	70
8	0,793	0,822	1,0121	1,5531	0,8443	0,9398	0,0955	34,4	35
9	0,822	0,851	1,5531	2,0941	0,9398	0,9819	0,0421	15,1	12
10	0,851	0,880	2,0941	2,6503	0,9819	0,9960	0,0141	5,1	6

Nesta tabela,

e_i = Frequência esperada = (Área em Z) · (Tamanho da amostra = 360)

f_i = Frequência absoluta da amostra

Tabela 9 – Cálculo da estatística D

No	e _i	f _i	e _a	f _a	d _i	D = d _i /n
1	3,6	6	3,6	6	2,4068	0,007
2	11,7	15	15,3	21	5,7117	0,016
3	28,6	31	43,9	52	8,1146	0,023
4	52,5	33	96,4	85	11,4267	0,032
5	72,5	77	169,0	162	6,9695	0,019
6	75,3	75	244,2	237	7,2411	0,020
7	58,7	70	302,9	307	4,0619	0,011
8	34,4	35	337,3	342	4,6645	0,013
9	15,1	12	352,5	354	1,5180	0,004
10	5,1	6	357,6	360	2,4411	0,007

Nesta tabela,

e_i = Frequência esperada

f_i = Frequência absoluta da amostra

e_a = Frequência esperada acumulada

f_a = Frequência absoluta da amostra acumulada

d_i = Diferença: $|f_a - e_a|$

n = Tamanho da amostra = 360

D = Valor da estatística do teste K-S para cada intervalo

Na Tabela 9, pode-se observar que a maior diferença “D” é 0,032. Então o valor da estatística D_{\max} do teste K-S é:

$$D_{\max} = 0,032$$

A figura 10 apresenta as diferenças do teste K-S.

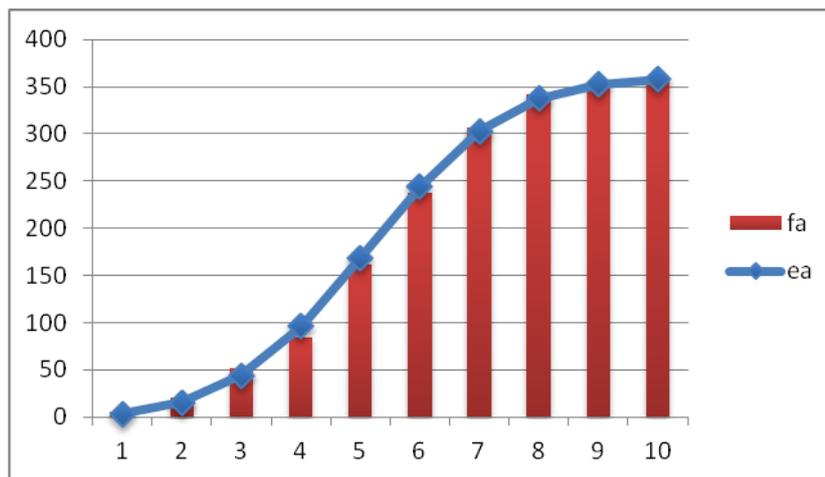


Figura 10 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada

- **Regra de decisão:**

$(D/H_0 \text{ Verdadeira}) \sim \text{Distribuição } D_{(\alpha; N)}$

α = Nível de significância

N = Número do intervalo adotado = 10

Observação: Anexo 2: Tabela Distribuição D.

Adotando $\alpha = 1\%$

$$D_{\max} = 0,032 < D_{(0,01; 10)} = 0,490$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 99%, os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 0,740$ e $\sigma^2 = 0,002$.

Adotando $\alpha = 5\%$

$$D_{\max} = 0,032 < D_{(0,05; 10)} = 0,410$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 95%, os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 0,740$ e $\sigma^2 = 0,002$.

Adotando $\alpha = 10\%$

$$D_{\max} = 0,032 < D_{(0,1; 10)} = 0,368$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 90%, os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 0,740$ e $\sigma^2 = 0,002$.

Em seguida trataram-se os dados das medidas 2 - Medições de Impedância do Equipamento Portátil (Medidas 2)

Tabela 10 – Estatística descritiva

<i>Estatística Descritiva</i>	<i>Valor</i>
Média	0,7440 mOhm
Erro padrão	0,0021 mOhm
Mediana	0,7500 mOhm
Moda	0,7024 mOhm
Desvio padrão	0,0401 mOhm
Variância da amostra	0,0016 mOhm ²
Curtose	-0,7278
Assimetria	-0,1910
Intervalo	0,1812 mOhm
Valor mínimo	0,6574 mOhm
Valor máximo	0,8386 mOhm
	267,8286
Soma	mOhm
Contagem	360

Tabela 11 – Intervalo do histograma

<i>Bloco (mOhm)</i>	<i>Frequência</i>
0,6574	1
0,6755	18
0,6936	30
0,7118	46
0,7299	30
0,7480	47
0,7661	71
0,7842	67
0,8024	30
0,8205	12
0,8386	8

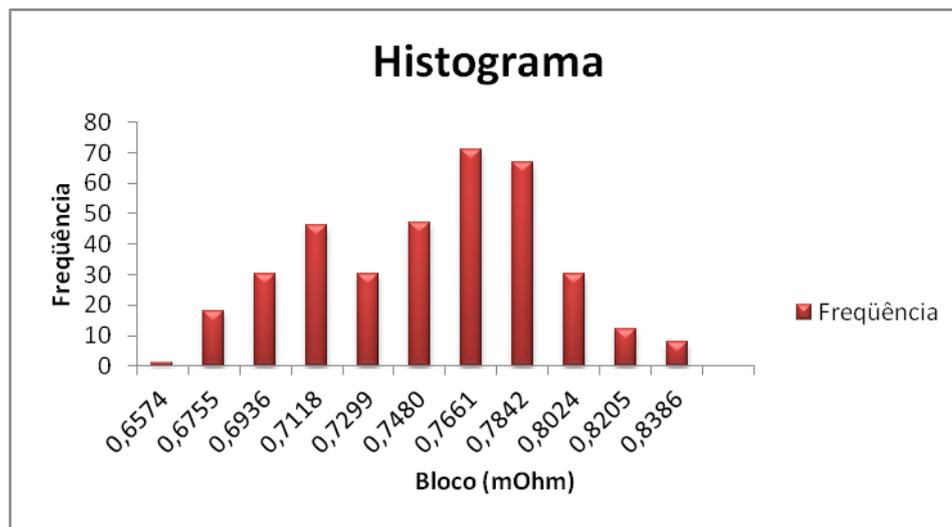


Figura 11 – Histograma de frequência: Medidas de impedância obtidas utilizando o equipamento portátil

A estatística descritiva forneceu valores próximos da média, mediana e moda, portanto pode-se inferir que a amostra segue uma Distribuição Normal de Probabilidade com média μ e variância σ^2 . Além disso, o histograma da amostra apresenta um sino com perfil similar ao de uma distribuição normal.

Foram calculados os seguintes estimadores dos parâmetros desta amostra:

Medidas 2 ~ N (μ , σ^2)

$$\bar{x}_2 = 0,7440$$

$$s_2^2 = 0,0016$$

A seguir aplica-se o teste K-S para determinar se a medidas 2 segue uma distribuição normal de probabilidade com os estimadores dos parâmetros calculados aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%:

- **Hipótese:**

H_0 = As medições das medidas 2 seguem uma distribuição normal de probabilidade

H_1 = As medições das medidas 2 não seguem uma distribuição normal de probabilidade

Tabela 12 – Tabela de frequência absoluta

No	Intervalo (mOhm)		Frequência absoluta	Frequência acumulada
1	0,6574	0,6755	19	19
2	0,6755	0,6936	30	49
3	0,6936	0,7118	46	95
4	0,7118	0,7299	30	125
5	0,7299	0,7480	47	172
6	0,7480	0,7661	71	243
7	0,7661	0,7842	67	310
8	0,7842	0,8024	30	340
9	0,8024	0,8205	12	352
10	0,8205	0,8386	8	360

A seguir os dados das medidas 2 foram padronizados em uma distribuição normal de probabilidades com $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$ permitindo calcular as frequências esperadas ou teóricas. Assim os valores de $Z \sim N(0,1)$ são obtidos pela equação (6).

Para este caso, os valores são:

X = valor do intervalo da Tabela 12

$$\mu = 0,7440$$

$$\sigma = 0,0401$$

Tabela 13 – Cálculo da frequência esperada

No	Intervalo (mOhm)		Intervalo Z		Área Z		Área em Z	e _i	f _i
1	0,6574	0,6755	-2,1596	-1,7077	0,0154	0,0438	0,0284	10,2	19
2	0,6755	0,6936	-1,7077	-1,2559	0,0438	0,1046	0,0607	21,9	30
3	0,6936	0,7118	-1,2559	-0,8040	0,1046	0,2107	0,1061	38,2	46
4	0,7118	0,7299	-0,8040	-0,3521	0,2107	0,3624	0,1517	54,6	30
5	0,7299	0,7480	-0,3521	0,0998	0,3624	0,5397	0,1774	63,8	47
6	0,7480	0,7661	0,0998	0,5516	0,5397	0,7094	0,1697	61,1	71
7	0,7661	0,7842	0,5516	1,0035	0,7094	0,8422	0,1328	47,8	67
8	0,7842	0,8024	1,0035	1,4554	0,8422	0,9272	0,0850	30,6	30
9	0,8024	0,8205	1,4554	1,9072	0,9272	0,9718	0,0445	16,0	12
10	0,8205	0,8386	1,9072	2,3591	0,9718	0,9908	0,0191	6,9	8

Onde,

e_i = Frequência esperada = (Área em Z) * (Tamanho da amostra = 360)

f_i = Frequência absoluta da amostra

Tabela 14 – Cálculo da frequência esperada

No	e _i	f _i	e _a	f _a	d _i	D = d _i /n
1	10,2	19	10,2	19	8,7611	0,024
2	21,9	30	32,1	49	16,8947	0,047
3	38,2	46	70,3	95	24,6922	0,069
4	54,6	30	124,9	125	0,0899	0,000
5	63,8	47	188,8	172	-16,7577	-0,047
6	61,1	71	249,8	243	-6,8379	-0,019
7	47,8	67	297,6	310	12,3569	0,034
8	30,6	30	328,3	340	11,7471	0,033
9	16,0	12	344,3	352	7,7129	0,021
10	6,9	8	351,2	360	8,8421	0,025

Onde,

e_i = Frequência esperada

f_i = Frequência absoluta da amostra

e_a = Frequência esperada acumulada

f_a = Frequência absoluta da amostra acumulada

d_i = Diferença: $|f_a - e_a|$

n = Tamanho da amostra = 360

D = Valor da estatística do teste K-S para cada intervalo

Na Tabela 14, pode-se observar que o valor máximo de “D” é 0,069. Então o valor da estatística D_{\max} do teste K-S é:

$$D_{\max} = 0,069$$

A figura 12 apresenta as diferenças do teste K-S.

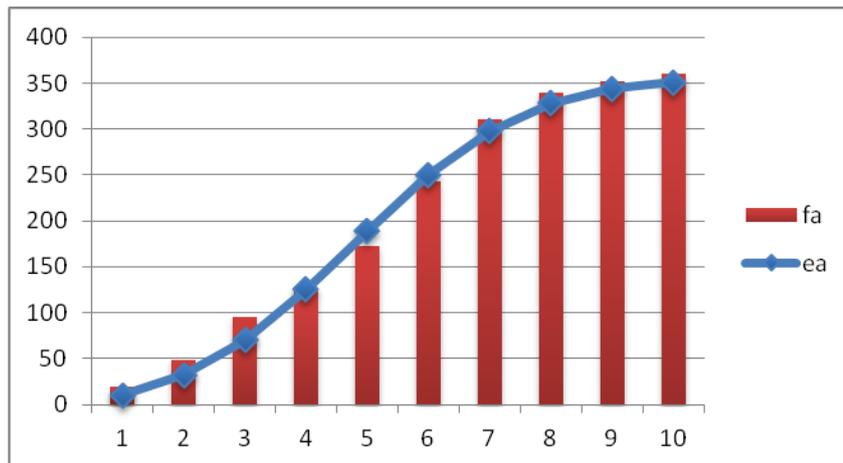


Figura 12 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada

- **Regra de decisão:**

$(D/H_0 \text{ Verdadeira}) \sim \text{Distribuição } D_{(\alpha; N)}$

α = Nível de significância

N = Número do intervalo adotado = 10

Observação: Anexo 2: Tabela Distribuição D.

Adotando $\alpha = 1\%$

$$D_{\max} = 0,069 < D_{(0,01; 10)} = 0,514$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 99% os dados das medidas 2 seguem uma distribuição normal com $\mu = 0,7440$ e $\sigma^2 = 0,0016$.

Adotando $\alpha = 5\%$

$$D_{\max} = 0,069 < D_{(0,05; 10)} = 0,432$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 95% os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 0,7440$ e $\sigma^2 = 0,0016$.

Adotando $\alpha = 10\%$

$$D_{\max} = 0,069 < D_{(0,1; 10)} = 0,388$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 90% os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 0,7440$ e $\sigma^2 = 0,0016$.

4.3.1.2.**Teste de significância para duas variâncias**

Para garantir a confiabilidade do resultado do teste de significância entre duas médias é necessário determinar se as variâncias das duas populações podem ser consideradas estatisticamente iguais a um nível de confiança determinado. Para o efeito da presente dissertação foram testadas as variâncias das duas populações de medições aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%, segundo o procedimento descrito por Jairo Simon da Fonseca e Gilberto de Andrade Martins [15][18].

- **Hipótese:**

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

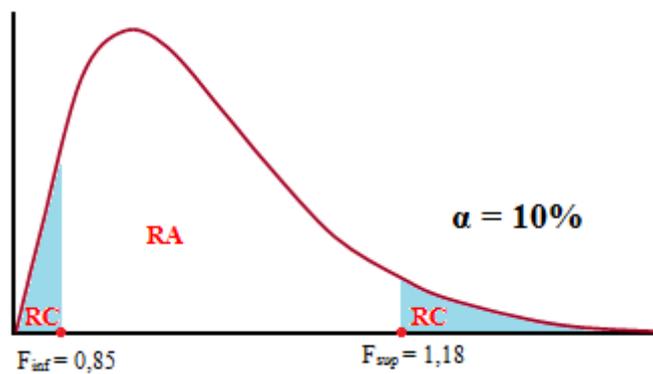
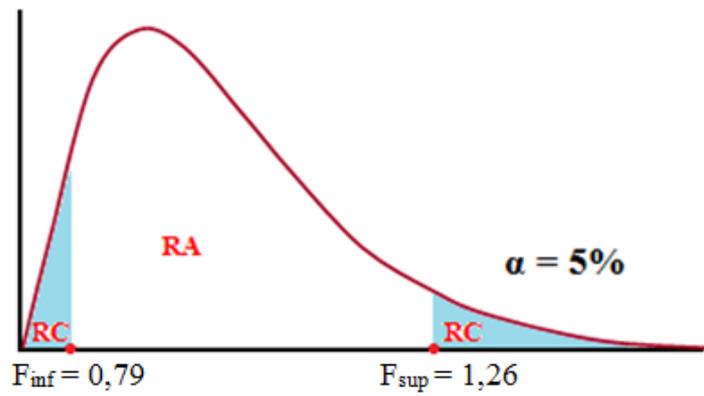
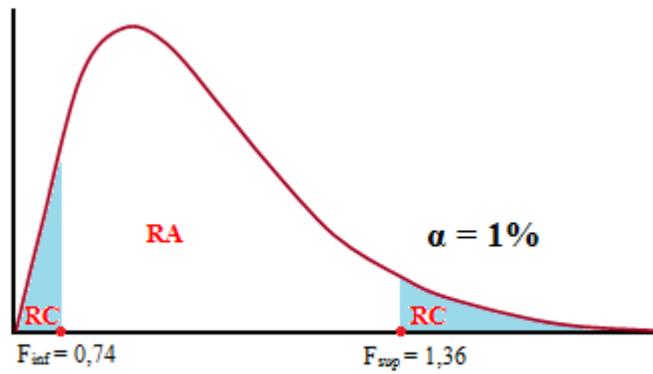
$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

- **Para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$; A variável é F com:**

$$\varphi_1 = n_1 - 1 = 360 - 1 = 359$$

$$\varphi_2 = n_2 - 1 = 360 - 1 = 359$$

- **Com auxílio da tabela da distribuição “F” (Anexos 3, 4 e 5), determinam-se a Região de Aceitação (RA) e a Região Crítica (RC), para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$.**



- Cálculo do valor da variável:

$$F_{cal} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (\text{Equação 7})$$

$$F_{cal} = \frac{0,002}{0,0016}$$

$$F_{cal} = 1,25$$

- **Conclusão:**

As variâncias das duas populações podem ser consideradas estatisticamente iguais aos níveis de confiança de 95% e 99% e diferentes para um nível de confiança de 90%. Assim, para efeito do cálculo da incerteza do sistema de medição, recomenda-se utilizar um nível de confiança de 95% com um fator de abrangência $k = 2$.

4.3.1.3. Independência nas medições das amostras

As medições feitas com o sistema remoto e as medições feitas com o equipamento portátil são consideradas independentes, pelo fato de o valor da medição com o sistema remoto não ter incidência no valor da medição com o instrumento e vice-versa. Além disso, as baterias são consideradas independentes e os valores da impedância e da tensão elétrica de um elemento não afetam o valor da mesma grandeza em outro elemento de bateria.

4.3.1.4. Teste de significância para a igualdade de duas médias

Visando determinar o nível de confiança no qual podem ser consideradas estatisticamente iguais as medições da impedância feitas pelo sistema SIMBA-GEBAT e aquelas realizadas pelo equipamento portátil, os dados das amostras foram submetidos ao teste paramétrico de significância para a igualdade de duas médias.

Para validar a sua aplicação faz-se necessário assegurar que os dados sejam normais, independentes, e as variâncias populacionais desconhecidas, mas consideradas iguais. Nas seções anteriores, foi demonstrado que as duas amostras cumprem com os critérios mencionados.

A seguir, foi aplicado o teste:

- **Hipóteses:**

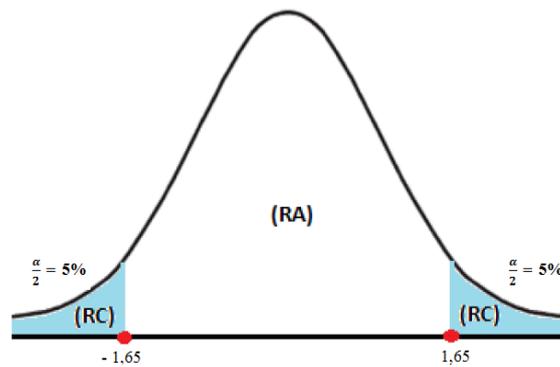
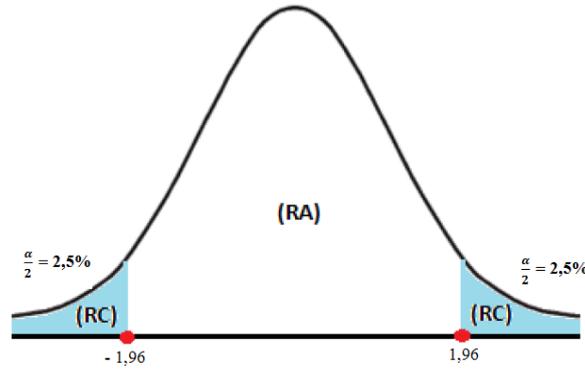
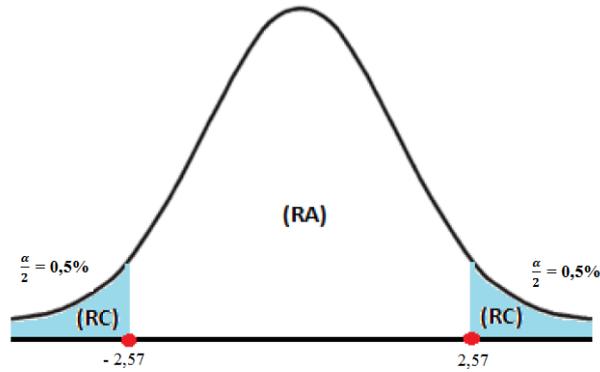
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

- Para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$; A variável “t” com:

$$\varphi_1 = n_1 + n_2 - 2 = 360 + 360 - 2 = 718$$

- Com auxílio da tabela da distribuição normal $Z \sim N(0,1)$, (Anexo 6), determinam-se a Região de Aceitação (RA) e a Região Crítica (RC), para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$.



- Cálculo do valor da variável:

$$t_{cal} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S_c \cdot \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}} \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde,

$$S_c = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad \text{(Equação 9)}$$

Usando a equação (9), a seguir, foi calculado o valor S_c :

$$S_c = \sqrt{\frac{(359)(0,002) + (359)(0,0016)}{360 + 360 - 2}}$$

$$S_c = 0,04243$$

Usando a equação (8), a seguir, foi calculado t_{cal} .

$$t_{cal} = \frac{(0,740 - 0,7440)}{(0,04243) \cdot \sqrt{\frac{360 + 360}{(360) \cdot (360)}}}$$

$$t_{cal} = -1,26$$

- **Conclusão:**

Como $t_{cal} = -1,26$, não se pode rejeitar $H_0: \mu_1 = \mu_2$, aos níveis de significância de 1%, 5% e 10%.

O teste de significância de igualdade entre duas médias demonstrou que as medições de impedância feitas pelo sistema SIMBA-GEBAT e pelo equipamento portátil podem ser considerados estatisticamente iguais, aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

4.3.2. Análise estatística da medição da tensão elétrica

A Tabela 15 apresenta resultados das medições da tensão elétrica de sessenta elementos de baterias do sistema SIMBA-GEBAT. A Tabela 16 apresenta os dados das Medidas 2 das medições do equipamento portátil de medição.

Tabela 15 – Medidas da tensão elétrica SIMBA-GEBAT (Medidas 1)

Medições SIMBA-GEBAT (V)													
Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12	Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12
1	2,175	2,175	2,176	2,176	2,172	2,185	31	2,170	2,175	2,178	2,176	2,175	2,177
2	2,177	2,176	2,176	2,177	2,173	2,177	32	2,168	2,174	2,179	2,176	2,175	2,175
3	2,178	2,179	2,178	2,178	2,179	2,177	33	2,180	2,181	2,188	2,182	2,183	2,182
4	2,178	2,177	2,178	2,179	2,175	2,172	34	2,188	2,188	2,187	2,189	2,190	2,190
5	2,189	2,189	2,188	2,188	2,188	2,179	35	2,181	2,182	2,190	2,182	2,183	2,181
6	2,188	2,189	2,188	2,188	2,189	2,180	36	2,180	2,180	2,191	2,189	2,190	2,192
7	2,188	2,188	2,189	2,187	2,188	2,195	37	2,198	2,198	2,196	2,197	2,194	2,199
8	2,189	2,186	2,188	2,186	2,187	2,185	38	2,209	2,209	2,206	2,208	2,205	2,205
9	2,180	2,188	2,180	2,179	2,180	2,178	39	2,205	2,204	2,202	2,204	2,200	2,200
10	2,181	2,179	2,180	2,179	2,181	2,178	40	2,206	2,207	2,206	2,207	2,207	2,206
11	2,186	2,185	2,186	2,187	2,189	2,197	41	2,201	2,195	2,198	2,195	2,197	2,200
12	2,190	2,190	2,183	2,183	2,182	2,191	42	2,199	2,199	2,196	2,198	2,195	2,197
13	2,204	2,204	2,203	2,204	2,200	2,200	43	2,201	2,203	2,203	2,200	2,206	2,207
14	2,200	2,199	2,199	2,200	2,196	2,196	44	2,204	2,204	2,200	2,203	2,203	2,204
15	2,206	2,205	2,205	2,205	2,201	2,201	45	2,185	2,185	2,182	2,184	2,181	2,183
16	2,203	2,202	2,202	2,203	2,199	2,197	46	2,185	2,184	2,185	2,183	2,181	2,180
17	2,207	2,207	2,206	2,207	2,203	2,203	47	2,184	2,184	2,182	2,183	2,181	2,181
18	2,202	2,202	2,201	2,202	2,197	2,197	48	2,184	2,180	2,183	2,183	2,182	2,180
19	2,200	2,199	2,199	2,199	2,195	2,193	49	2,210	2,222	2,195	2,200	2,199	2,200
20	2,197	2,196	2,195	2,197	2,192	2,189	50	2,195	2,220	2,198	2,196	2,199	2,200
21	2,198	2,196	2,195	2,196	2,192	2,190	51	2,205	2,220	2,210	2,195	2,212	2,205
22	2,200	2,200	2,205	2,207	2,202	2,201	52	2,203	2,219	2,210	2,203	2,199	2,199
23	2,201	2,200	2,199	2,200	2,196	2,194	53	2,185	2,168	2,183	2,181	2,186	2,181
24	2,205	2,205	2,204	2,204	2,200	2,200	54	2,183	2,169	2,185	2,182	2,187	2,180
25	2,196	2,197	2,197	2,199	2,199	2,195	55	2,184	2,170	2,184	2,182	2,186	2,181
26	2,198	2,197	2,198	2,199	2,198	2,198	56	2,183	2,168	2,184	2,181	2,186	2,180
27	2,196	2,198	2,196	2,199	2,197	2,196	57	2,185	2,167	2,181	2,182	2,185	2,180
28	2,198	2,197	2,198	2,199	2,199	2,200	58	2,183	2,175	2,183	2,182	2,187	2,182
29	2,172	2,180	2,185	2,180	2,178	2,175	59	2,186	2,177	2,186	2,183	2,185	2,180
30	2,169	2,174	2,178	2,175	2,174	2,173	60	2,181	2,175	2,183	2,182	2,185	2,180

Tabela 16 – Medida da tensão elétrica do Equipamento Portátil (Medidas 2)

Medições Equipamento Portátil (V)													
Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12	Elemento	31/08/12	14/09/12	21/09/12	22/09/12	02/10/12	10/10/12
1	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,20	31	2,16	2,17	2,16	2,17	2,17	2,16
2	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	32	2,16	2,17	2,16	2,17	2,17	2,16
3	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	33	2,18	2,18	2,19	2,18	2,18	2,18
4	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,18	34	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
5	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,18	35	2,18	2,18	2,19	2,18	2,18	2,18
6	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,18	36	2,18	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
7	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,20	37	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
8	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	38	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
9	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,19	39	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
10	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,19	40	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
11	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,20	41	2,19	2,18	2,19	2,18	2,18	2,19
12	2,19	2,19	2,18	2,18	2,18	2,19	42	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18	2,18
13	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	43	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
14	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	44	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
15	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	45	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
16	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	46	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
17	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	47	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
18	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	48	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	49	2,20	2,22	2,20	2,19	2,19	2,20
20	2,18	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19	50	2,19	2,22	2,19	2,19	2,19	2,20
21	2,18	2,18	2,19	2,18	2,18	2,19	51	2,20	2,22	2,20	2,20	2,20	2,20
22	2,19	2,19	2,20	2,19	2,19	2,20	52	2,20	2,21	2,20	2,19	2,19	2,20
23	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	53	2,19	2,17	2,19	2,19	2,19	2,19
24	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	54	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
25	2,18	2,18	2,18	2,19	2,19	2,18	55	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
26	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	56	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
27	2,18	2,19	2,18	2,19	2,19	2,18	57	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
28	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	58	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19
29	2,16	2,17	2,17	2,17	2,17	2,16	59	2,19	2,18	2,19	2,19	2,19	2,19
30	2,16	2,16	2,16	2,17	2,17	2,16	60	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19	2,19

4.3.2.1. Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S)

O teste K-S foi utilizado para testar se os dados apresentados nas Tabelas 15 e 16 seguem distribuição normal de probabilidade. Inicialmente foram feitas inferências estatísticas que forneceram uma idéia preliminar acerca da distribuição de probabilidades que segue as amostras estudadas.

Primeiramente, foram tratados os dados das medidas 1 – Medições de tensão elétrica da SIMBA-GEBAT.

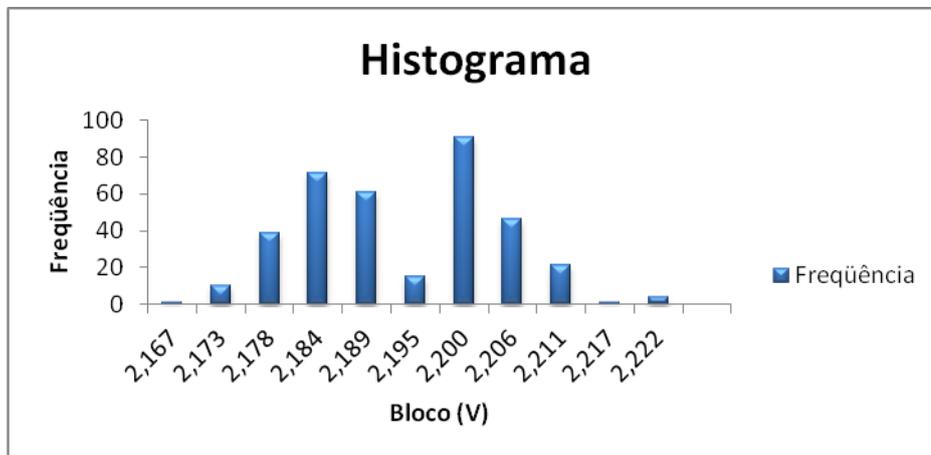
A Tabela 17 apresenta a estatística descritiva, a qual forneceu valores próximos da média, mediana e moda, portanto pode-se inferir que a amostra segue uma distribuição normal de probabilidade com média μ e variância σ^2 . A Tabela 18 apresenta a frequência absoluta em cada intervalo. Além disso, o histograma da figura 13, embora apresente uma frequência atípica na faixa de 2,195 V, oferece um perfil similar ao de uma distribuição normal.

Tabela 17 – Estatística descritiva

<i>Estatística Descritiva</i>	<i>Valor</i>
Média	2,191 V
Erro padrão	0,001 V
Mediana	2,189 V
Moda	2,200 V
Desvio padrão	0,011 V
Variância da amostra	0,00012 V ²
Curtose	-0,806
Assimetria	0,093
Intervalo	0,055 V
Valor mínimo	2,167 V
Valor máximo	2,222 V
Soma	788,646 V
Contagem	360

Tabela 18 – Intervalo do histograma

<i>Bloco (V)</i>	<i>Frequência</i>
2,167	1
2,173	10
2,178	39
2,184	71
2,189	61
2,195	15
2,200	91
2,206	46
2,211	21
2,217	1
2,222	4

**Figura 13** – Histograma de frequência: Medições da tensão elétrica do SIMBAT-GEBAT

Foram calculados os seguintes estimadores dos parâmetros desta amostra:

Medidas 1 $\sim N(\mu, \sigma^2)$

$$\bar{x}_1 = 2,191$$

$$s_1^2 = 0,00012$$

A seguir foi aplicado o teste K-S para determinar se a medidas 1 segue uma distribuição normal de probabilidade com os estimadores dos parâmetros calculados aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%:

- **Hipótese:**

H_0 = As medições das medidas 1 seguem uma distribuição normal de probabilidade.

H_1 = As medições das medidas 1 não seguem uma distribuição normal de probabilidade.

Tabela 19 – Tabela de frequência absoluta

No	Intervalo (V)		Frequência absoluta	Frequência acumulada
1	2,167	2,173	11	11
2	2,173	2,178	39	50
3	2,178	2,184	71	121
4	2,184	2,189	61	182
5	2,189	2,195	15	197
6	2,195	2,200	91	288
7	2,200	2,206	46	334
8	2,206	2,211	21	355
9	2,211	2,217	1	356
10	2,217	2,222	4	360

A seguir, os dados das medidas 1 foram padronizados em uma distribuição normal de probabilidades com $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$, para calcular as frequências esperadas ou teóricas. Assim os valores de $Z \sim N(0,1)$ são obtidos pela equação 6 (Página 45):

Onde,

X = valor do intervalo da Tabela 19

$$\mu = 2,191$$

$$\sigma = 0,011$$

Tabela 20 – Cálculo da frequência esperada

No	Intervalo (V)		Intervalo Z		Área do Intervalo Z		Área em Z	e_i	f_i
1	2,167	2,173	-2,1581	-1,6569	0,0155	0,0488	0,0333	12,0	11
2	2,173	2,178	-1,6569	-1,1557	0,0488	0,1239	0,0751	27,0	39
3	2,178	2,184	-1,1557	-0,6546	0,1239	0,2564	0,1325	47,7	71
4	2,184	2,189	-0,6546	-0,1534	0,2564	0,4390	0,1827	65,8	61
5	2,189	2,195	-0,1534	0,3478	0,4390	0,6360	0,1970	70,9	15
6	2,195	2,200	0,3478	0,8490	0,6360	0,8020	0,1660	59,8	91
7	2,200	2,206	0,8490	1,3501	0,8020	0,9115	0,1095	39,4	46
8	2,206	2,211	1,3501	1,8513	0,9115	0,9679	0,0564	20,3	21
9	2,211	2,217	1,8513	2,3525	0,9679	0,9907	0,0227	8,2	1
10	2,217	2,222	2,3525	2,8536	0,9907	0,9978	0,0072	2,6	4

Onde,

e_i = Frequência esperada = (Área em Z) · (Tamanho da amostra = 360)

f_i = Frequência absoluta da amostra

Tabela 21 – Cálculo da estatística D

No	e_i	f_i	e_a	f_a	d_i	$D = d_i/n$
1	12,0	11	12,0	11	0,9910	0,003
2	27,0	39	39,0	50	10,9638	0,030
3	47,7	71	86,7	121	34,2709	0,095
4	65,8	61	152,5	182	29,5094	0,082
5	70,9	15	223,4	197	26,3937	0,073
6	59,8	91	283,2	288	4,8288	0,013
7	39,4	46	322,6	334	11,4213	0,032
8	20,3	21	342,9	355	12,1086	0,034
9	8,2	1	351,1	356	4,9227	0,014
10	2,6	4	353,7	360	6,3438	0,018

Nesta tabela,

e_i = Frequência esperada

f_i = Frequência absoluta da amostra

e_a = Frequência esperada acumulada

f_a = Frequência absoluta da amostra acumulada

d_i = Diferença: $|f_a - e_a|$

n = Tamanho da amostra = 360

D = Valor da estatística do teste K-S para cada intervalo

Na Tabela 21, pode-se observar que o valor máximo de “D” é 0,095. Então o valor da estatística D_{\max} do teste K-S é:

$$D_{\max} = 0,095$$

A figura 14 apresenta as diferenças do teste K-S.

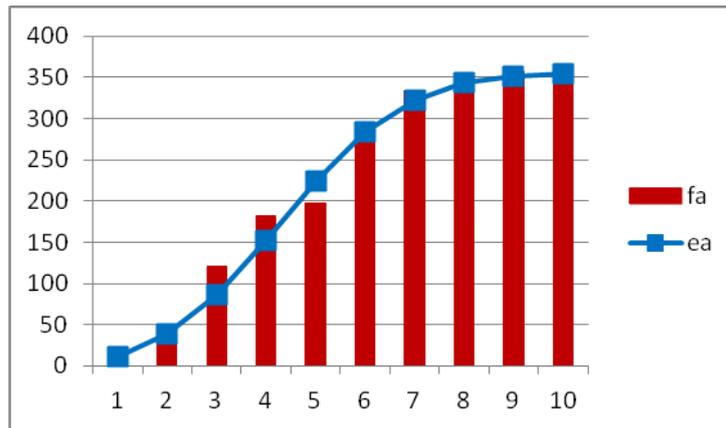


Figura 14 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada

- **Regra de decisão:**

$(D/H_0 \text{ Verdadeira}) \sim \text{Distribuição } D_{(\alpha; N)}$

α = Nível de significância

N = Número do intervalos adotado = 10

Observação: Anexo 2: Tabela Distribuição D.

Adotando $\alpha = 1\%$

$$D_{\max} = 0,095 < D_{(0,01; 10)} = 0,490$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 99%, os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 2,191$ e $\sigma^2 = 0,00012$.

Adotando $\alpha = 5\%$

$$D_{\max} = 0,0095 < D_{(0,05; 10)} = 0,410$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 95%, os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 2,191$ e $\sigma^2 = 0,00012$.

Adotando $\alpha = 10\%$

$$D_{\max} = 0,095 < D_{(0,1; 10)} = 0,368$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 90%, os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 2,191$ e $\sigma^2 = 0,00012$.

Em seguida trataram-se os dados das Medidas 2 - Medições da tensão elétrica do equipamento portátil (Medidas 2)

Tabela 22 – Estatística descritiva

<i>Estatística Descritiva</i>	<i>Valor</i>
Média	2,19 V
Erro padrão	0,00043 V
Mediana	2,19 V
Moda	2,19 V
Desvio padrão	0,0083 V
Variância da amostra	0,0001 V ²
Curtose	4,42
Assimetria	-0,91
Intervalo	0,06 V
Mínimo	2,16 V
Máximo	2,22 V
Soma	787,44 V
Contagem	360,00

Tabela 23 – Intervalo do histograma

<i>Bloco (V)</i>	<i>Frequência</i>
2,16	12
2,17	13
2,18	62
2,20	252
2,21	17
2,22	4

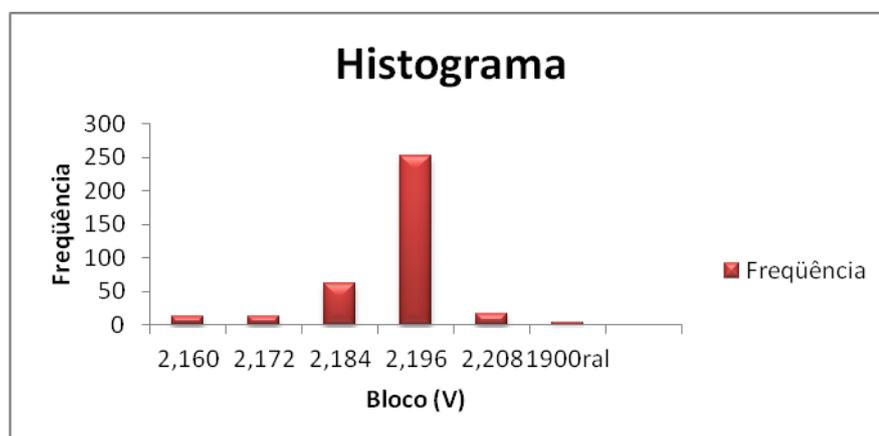


Figura 15 – Histograma de frequência: Medidas da tensão Elétrica do Equipamento Portátil

A estatística descritiva forneceu valores iguais em quanto à média, mediana e moda, portanto pode-se inferir que a amostra segue uma Distribuição Normal de Probabilidade com média μ e variância σ^2 . Além disso, o histograma da amostra apresenta um sino com perfil similar ao de uma distribuição normal.

70% das medições feitas concentram-se na faixa de 2,20V. Por isso, para evitar ter intervalos com frequências nulas, foi assumido um número de intervalo $n = 5$.

Foram calculados os seguintes estimadores dos parâmetros desta amostra:

Medidas 2 ~ N (μ , σ^2)

$$\bar{x}_2 = 2,19$$

$$s_2^2 = 0,0001$$

A seguir foi aplicado o teste K-S para determinar se a medidas 2 segue uma distribuição normal de probabilidade com os estimadores dos parâmetros calculados aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%:

- **Hipótese:**

H_0 = As medições das medidas 2 seguem uma distribuição normal de probabilidade.

H_1 = As medições das medidas 2 não seguem uma distribuição normal de probabilidade.

Tabela 24 – Tabela de frequência absoluta

No	Intervalo (V)		Frequência absoluta	Frequência acumulada
1	2,16	2,17	25	25
2	2,17	2,18	62	87
3	2,18	2,20	252	339
4	2,20	2,21	17	356
5	2,21	2,22	4	360

A seguir os dados das medidas 2 serão padronizados em uma distribuição normal de probabilidades com $\mu = 0$ e $\sigma^2 = 1$ para calcular as frequências esperadas ou teóricas. Assim os valores de $Z \sim N(0,1)$ são obtidos pela equação 6 (Página 45).

Para este caso, os valores são:

X = valor do intervalo da tabela de frequência absoluta

$$\mu = 2,19$$

$$\sigma = 0,0083$$

Tabela 25 – Cálculo da frequência esperada

No	Intervalo (V)		Intervalo Z		Área do Intervalo Z		Área em Z	e_i
1	2,16	2,17	-3,3128	-1,8584	0,0005	0,0316	0,0311	11,2
2	2,17	2,18	-1,8584	-0,4040	0,0316	0,3431	0,3116	112,2
3	2,18	2,20	-0,4040	1,0504	0,3431	0,8532	0,5101	183,6
4	2,20	2,21	1,0504	2,5048	0,8532	0,9939	0,1406	50,6
5	2,21	2,22	2,5048	3,9591	0,9939	1,0000	0,0061	2,2

Nesta tabela,

e_i = Frequência esperada = (Área em Z) · (Tamanho da amostra = 360)

f_i = Frequência absoluta da amostra

Tabela 26 – Cálculo da estatística D

No	e_i	f_i	e_a	f_a	d_i	$D = d_i/n$
1	11,2	25	11,2	25	13,8054	0,038
2	112,2	62	123,4	87	36,3527	0,101
3	183,6	252	307,0	339	32,0037	0,089
4	50,6	17	357,6	356	1,6281	0,005
5	2,2	4	359,8	360	0,1798	0,001

Nesta tabela,

e_i = Frequência esperada

f_i = Frequência absoluta da amostra

e_a = Frequência esperada acumulada

f_a = Frequência absoluta da amostra acumulada

d_i = Diferença: $|f_a - e_a|$

n = Tamanho da amostra = 360

D = Valor da estatística do teste K-S para cada intervalo

Na Tabela 26, pode-se observar que o valor máximo de “D” é 0,101. Então o valor da estatística D_{\max} do teste K-S é:

$$D_{\max} = 0,101$$

A figura 16 apresenta as diferenças do teste K-S.

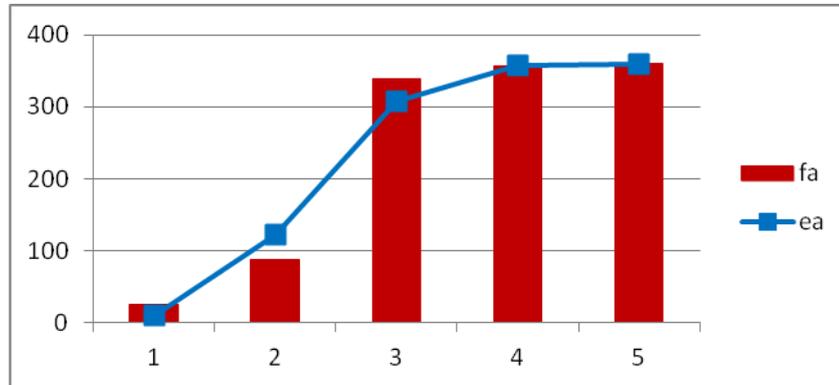


Figura 16 – Frequência absoluta da amostra acumulada vs Frequência esperada acumulada

- **Regra de decisão:**

$(D/H_0 \text{ Verdadeira}) \sim \text{Distribuição } D_{(\alpha; N)}$

α = Nível de significância

N = Número do intervalo adotado = 5

Observação: Anexo 2: Tabela Distribuição D.

Adotando $\alpha = 1\%$

$$D_{\max} = 0,101 < D_{(0,01; 5)} = 0,669$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 99% os dados das medidas 2 seguem uma distribuição normal com $\mu = 2,19$ e $\sigma^2 = 0,0001$.

Adotando $\alpha = 5\%$

$$D_{\max} = 0,101 < D_{(0,05; 5)} = 0,565$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 95% os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 2,19$ e $\sigma^2 = 0,0001$.

Adotando $\alpha = 10\%$

$$D_{\max} = 0,101 < D_{(0,1; 5)} = 0,510$$

Conclusão:

Com um nível de confiança de 90% os dados das medidas 1 seguem uma distribuição normal com $\mu = 2,19$ e $\sigma^2 = 0,0001$.

4.3.2.2.

Teste de significância para duas variâncias

A seguir, foi aplicado o teste de significância para duas variâncias, segundo o procedimento descrito por Jairo Simon da Fonseca e Gilberto de Andrade Martins [15][18].

- **Hipótese:**

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

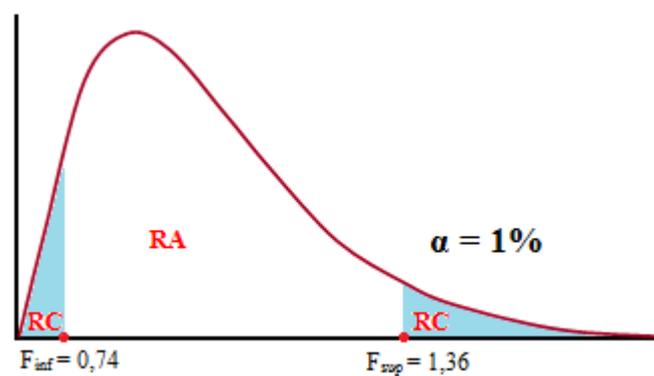
$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

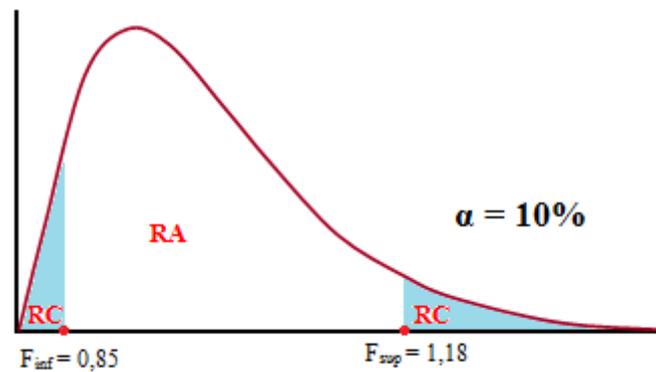
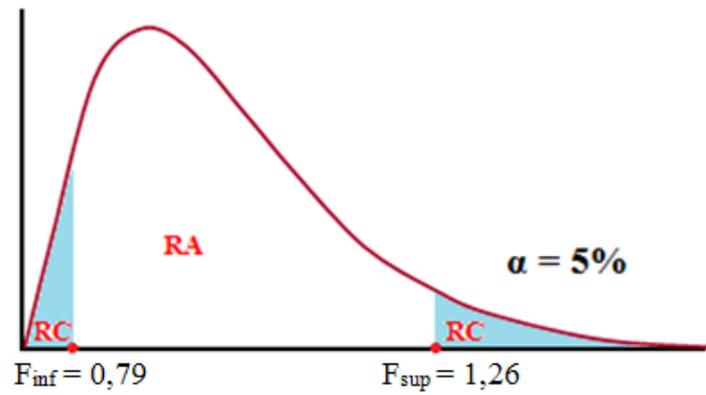
- Para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$; A variável é F com:

$$\varphi_1 = n_1 - 1 = 360 - 1 = 359$$

$$\varphi_2 = n_2 - 1 = 360 - 1 = 359$$

- Com auxílio da tabela da distribuição “F” (Anexos 3, 4 e 5), determinam-se a Região de Aceitação (RA) e a Região Crítica (RC), para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$.





- **Cálculo do valor da variável:**

Aplicando-se a equação (7):

$$F_{cal} = \frac{0,00012}{0,0001}$$

$$F_{cal} = 1,20$$

- **Conclusão:**

As variâncias das duas populações podem ser consideradas estatisticamente iguais aos níveis de confiança de 95% e 99% e diferentes para um nível de confiança de 90%. Assim, para efeito do cálculo da incerteza do sistema de medição, recomenda-se utilizar um nível de confiança de 95% com um fator de abrangência $k = 2$.

4.3.2.3. Teste de significância para a igualdade de duas médias

Visando determinar o nível de confiança no qual podem ser consideradas estatisticamente iguais as medições da tensão elétrica feitas pelo sistema SIMBA-GEBAT e as feitas pelo equipamento portátil, os dados das amostras foram submetidos ao teste paramétrico de significância para a igualdade de duas médias.

Para a aplicação é necessário que os dados sejam normais, independentes, e as variâncias populacionais desconhecidas, mas consideradas iguais. Nas seções anteriores, foi demonstrado que as duas amostras cumprem com os critérios mencionados.

A seguir, aplica-se o teste:

- **Hipóteses:**

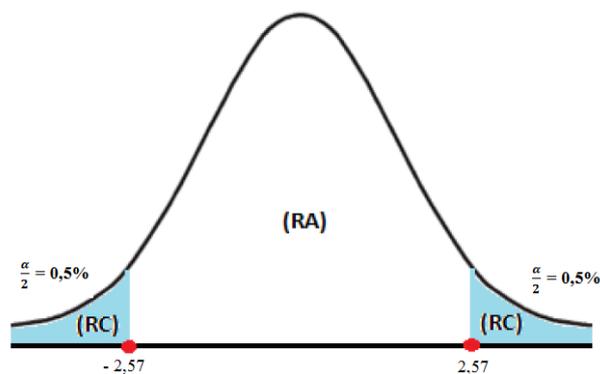
$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

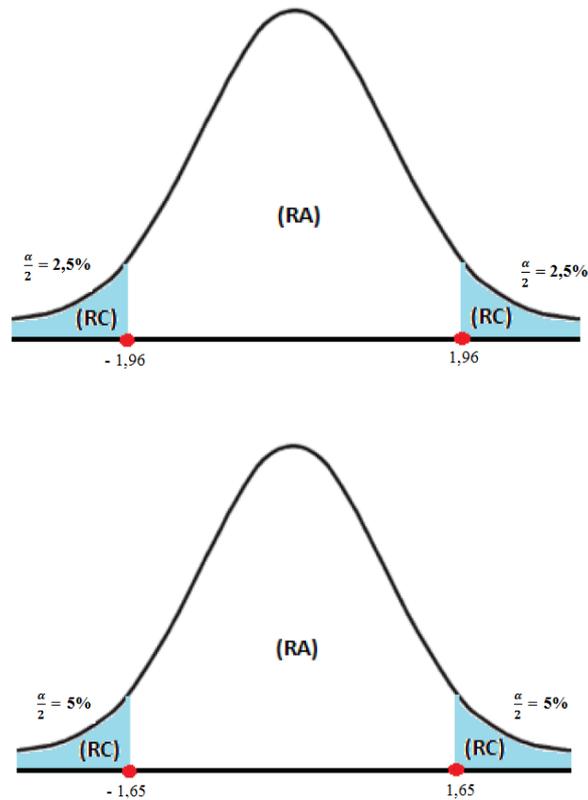
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

- Para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$; A variável “t” com:

$$\varphi_1 = n_1 + n_2 - 2 = 360 + 360 - 2 = 718$$

- Com auxílio da tabela da distribuição normal $Z \sim N(0,1)$, (Anexo 6), determinam-se a Região de Aceitação (RA) e a Região Crítica (RC), para $\alpha = 1\%$; $\alpha = 5\%$; $\alpha = 10\%$.





- **Cálculo do valor da variável:**

Aplicando-se a equação (9):

$$S_c = \sqrt{\frac{(359)(0,0001) + (359)(0,00012)}{360 + 360 - 2}}$$

$$S_c = 0,01404881$$

Aplicando-se a equação (8):

$$t_{cal} = \frac{(2,191 - 2,19)}{(0,01404881) \cdot \sqrt{\frac{360 + 360}{(360) \cdot (360)}}}$$

$$t_{cal} = 0,95$$

- **Conclusão:**

Como $t_{cal} = 0,95$, não se pode rejeitar $H_0 : \mu_1 = \mu_2$, aos níveis de significância de 1%, 5% e 10%.

O teste de significância de igualdade entre duas médias demonstrou que as medições de impedância feitas pelo sistema SIMBA-GEBAT e pelo equipamento portátil podem ser considerados estatisticamente iguais, aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

5 Conclusões

No presente trabalho foi possível validar em condições reais de operação a técnica de monitoramento remoto de baterias estacionárias desenvolvida em ambiente laboratorial. A validação foi efetuada mediante testes estatísticos, paramétricos e não paramétricos, realizados em níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

Para a validação estatística foi utilizado o teste de significância para a igualdade de duas médias, que considera as populações normais e independentes.

A conformidade à distribuição normal de probabilidade foi realizada com base nos testes de hipóteses K-S e de significância para a igualdade de duas variâncias. De forma qualitativa foi definida a independência entre as duas amostras testadas.

Foram consideradas independentes devido ao fato do valor da medição realizada com o sistema remoto não ter incidência sobre o valor da medição realizada com o instrumento e vice-versa.

Os resultados do teste K-S permitiram demonstrar para os níveis de confiança de 90%, 95% e 99% que os dados das amostras 1 e 2 seguem uma distribuição normal para as medidas de impedância e de tensão elétrica.

Os resultados da significância para a igualdade de duas variâncias das duas populações, de impedância e de tensão elétrica, foram considerados estatisticamente iguais aos níveis de confiança de 95% e 99% e diferentes para um nível de confiança de 90%.

O teste de significância de igualdade entre duas médias demonstrou que as medições de impedância e tensão elétrica feitas pelo sistema SIMBA-GEBAT e pelo equipamento portátil podem ser considerados estatisticamente iguais, aos níveis de confiança de 90%, 95% e 99%.

As análises estáticas dos dados do equipamento de monitoramento remoto de baterias (frente ao equipamento portátil) demonstraram que o método de

monitoramento apresenta confiabilidade em suas medições de tensão elétrica e impedância.

O equipamento validado no presente trabalho possui a vantagem de operar remotamente, resultando em uma poderosa ferramenta que proporciona aos usuários aumento da confiabilidade dos sistemas de *backup* de energia e auxílio na sua tomada de decisão crítica. E mais, realiza as medições de forma automática sem a necessidade de interferência por profissional especializado, o que proporciona aos usuários uma diminuição dos custos operacionais e erros por falhas humanas.

Como resultado e contribuição do trabalho, a nova metodologia proposta foi validada. Por já estar inserida no mercado e estar disponível para outras concessionárias que dela desejarem fazer uso, constitui inovação tecnológica nacional.

Referências bibliográficas

- [1] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; BARRETO JUNIOR, J.T. **Estudo da viabilidade de avaliação de baterias chumbo-ácidas através dos métodos de condutância e impedância.** Campinas: CPqD, 2001. 100p. (Light. Programa de P&D Aneel – Projeto 3105/2001). Projeto concluído.
- [2] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; PESENTI, G.R.. **Estudo para detecção e gerenciamento de falhas de baterias.** Campinas: CPqD, 2006. 235p. (Light. Programa de P&D Aneel – Projeto 019/2006). Projeto concluído.
- [3] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SOARES, L.A. **Estudo da viabilidade de avaliação de baterias chumbo ácidas através dos métodos de condutância e impedância: Resultado da avaliação de baterias instaladas em subestações da Light** – Final, Campinas, 2002, 36p. Relatório Técnico CPqD PD.33.11.25A.0014A/RT-04-AA
- [4] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; PESENTI, G.R.. **Desenvolvimento de sistema para monitoração remota de baterias.** Campinas: CPqD, 2008.350p. (Light. Programa de P&D Aneel – Projeto 033/2008). Projeto concluído.
- [5] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; CARDOSO, P.E.; SOARES, L.A.; YAMAGUTI, F. (2004). **Stationary VRLA battery evaluations: Internal measurements and capacity test. An experience at the Claro Cellular Mobile Company.** BATTCON 2004 - Florida, USA.
- [6] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; CARDOSO, P.E.; SOARES, L.A. (2004). **Evaluation of the relationship between conductance and capacity measurements of VRLA batteries in Brazil.** INTELEC 2004 - Chicago, USA.
- [7] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; JÚNIOR, M.G.R. (2000). **Evaluation tools for batteries employed in outdoor cabinets - An experience of a brazilian telecom company.** INTELEC 2000 - Phoenix/EUA.
- [8] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SOARES, L.A. (2002). **Failure detection of stationary lead-acid batteries in service in various regions of Brazil.** INTELEC 2002 - Montreal/Canadá.

- [9] PINHEL, A.S.; ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SOARES, L.A.; SANTOS, G.R.; ARIOLI, V.T.; FRARE, P.T. (2008). **Impacto da estocagem na vida útil de baterias chumbo-ácidas reguladas por válvula - (VRLA)**. 23º Congresso Brasileiro de Manutenção, Santos-SP, Brasil.
- [10] PESENTI, G.R.; ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SANTOS, G.R.; LOPES, P.H.O.; NAZARI, R.S.; ARIOLI, V.T. (2012). **Sistema de monitoração remota para baterias chumbo-ácidas estacionárias**. SENDI – Rio de Janeiro/Brasil.
- [11] PESENTI, G.R.; ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SOARES, L.A.; SANTOS, G.R.; ARIOLI, V.T.; FRARE, P.T.; LOPES, P.H.O. (2010). **Stationary lead-Acid batteries maintenance management system**. INTELEC - Orlando/EUA.
- [12] VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM)**. 94 p. Duque de Caxias, RJ, INMETRO, 2012.
- [13] BERNDT, D. **Maintenance-free batteries - A handbook of battery technology**. 3rd edition, 2001.
- [14] ROSOLEM, M.F.N.C.; BECK, R.F.; SOARES, L.A.; SANTOS, G.R.; ARIOLI, V.T.; FRARE, P.T.; FONSECA, J.C. (2009). **The batterie's regulatory process in Brazilian Telecommunications Industry**. Telescon - Viena/Austria.
- [15] VERGARA, S.C. **Métodos de pesquisa em administração**. São Paulo: Atlas, 2005.
- [16] SALAMEH, Z. M.; CASACCA, M.A.; LYNCH, W.A. (1992). **A mathematical model for lead-acid batterie**. IEEE Transactions on Energy Conversion, volume 7, no. 1, 93-98
- [17] JANTHARAMIN, N.; ZHANG, L. (2008). **New dynamic model for lead-acid batteries**. IEEE.
- [18] FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A. **Curso de estatística**. 6^a Edição. São Paulo. Editora Atlas S.A., 2012. p. 213-215.

Anexo 1 – Certificado de calibração shunt de 60 a / 60 mv



Laboratório de Calibração
PD.SM.11.22A.3986A/CC-01-AA

1 / 3

Certificado de Calibração

Calibration Certificate

Número: PD.SM.11.22A.3986A/CC-01-AA

Number

Equipamento: Shunt de Corrente

Equipment

Fabricante: KRON

Manufacturer

Modelo: 60A/60mV

Model

Número de Série: 35599

Serial Number

Identificação: RCE000900

Identification

Cliente: Fundação CPQD - ASE

Customer

Contato: Vitor Torquato Arioli

Contact

Data da calibração: 03/Out/2012

Calibration Date

Condições Ambientais – Temperatura: 23±3°C, Umidade: 55±15%

Ambient Conditions

Este certificado atende aos requisitos estabelecidos na norma NBR ISO/IEC 17025/2005, relativos a competência do laboratório incluindo sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades – SI). A presente calibração não está inserida em escopo de acreditação do Laboratório de Calibração do CPQD pelo Cgcre para calibração de equipamentos nas áreas de: óptica, tempo e frequência e rádio frequência (124).

This certificate meets the NBR ISO/IEC 17025/2005 accreditation requirements to ensure the laboratory competence including traceability to national standards or according to the International System of Units (SI). This calibration is not within the scope of CPQD Laboratory accreditation by Cgcre of instrument calibration capabilities for optics, time and frequency and radio frequency (124).

Este documento foi assinado digitalmente

Este documento foi assinado digitalmente

Luis Antônio Bueno
Metrologista
Metrologist

Vicente Olimpio Pavan
Responsável pelo Lab. de Cal.
Responsible for the Calibration Laboratory

Reproduções deste documento só tem validade se forem autorizadas pelo Laboratório de Calibração
Reproductions of this document are valid only with the permission of the Calibration Laboratory

CPQD – Todos os direitos reservados.
CPQD – All rights reserved.

Laboratório de Calibração



Laboratório de Calibração
PD.SM.11.22A.3986A/CC-01-AA

2 / 3

1 Identificação do laboratório de calibração

Fundação CPQD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
Rod. Campinas–Mogi-Mirim, km 118,5 – SP340 Caixa Postal 6070
13086-902 – Campinas – SP
Diretoria de Laboratórios e Infraestrutura de Redes
Gerência de Tecnologia em Terminais e Equipamentos
Laboratório de Calibração labcal@cpqd.com.br
Telefone: (19) 3705-7118 Fax: (19) 3705-6558

2 Identificação do Cliente

Número OS: 20120700 Número Atividade: 1125
Empresa: Fundação CPQD - ASE
Endereço: Rod. Campinas/Mogi-Mirim, km 118,5 - SP340
CEP: 13086-902 Cidade: Campinas UF: SP

3 Procedimento de calibração

A calibração é executada empregando-se métodos de comparação direta ou da substituição contra padrões controlados, mantendo uma cadeia de rastreabilidade a padrões nacionais e/ou internacionais.

Para Medidas de Tensão AC/DC, Corrente AC/DC e Resistência são empregados, como padrões, calibradores e multímetros de precisão, shunt, décadas resistiva e osciloscópio, rastreados a padrões nacionais e/ou internacionais, todos mantidos sobre controle metrológico e interligados à USC por cabos de baixíssima perda e histerese, conforme procedimento PD.70.300.022.000 (Medidores AC/DC Analógicos e Digitais), PD.70.300.048.000 (Fontes AC/DC Analógicos e Digitais / Simuladores de Resistência e Carga Dinâmica), PD.70.300.049.000 (Shunt de Corrente), PD.70.300.023.000 (Ponta de Corrente) e PD.70.300.024.000 (Medidor de Potência HP).

Para minimização de componentes de incerteza do Tipo A, são realizadas, no mínimo, duas leituras por ponto, sendo adotada a média das leituras como resultado da medição. A incerteza de medição é a combinação da incerteza tipo A com as demais incertezas do sistema de medição.

4 Padrões utilizados

Fabricante	Modelo	Descrição	Série ou Patrimônio	Validade	Rastreabilidade
Agilent	34970A	Data Acquisition / Switch Unit	MY44035819	ago/2013	PD.SM.11.22A.2669A - CPQD
HP	6671A	System DC Power Supply	3351A00492	---	Não Requer Calibração
Kron	60A/60mV	Shunt de Corrente	5914	jul/2013	118061-101 - IPT - RBC

Os resultados desta calibração referem-se, exclusivamente, a esta USC (Unidade Sob Calibração).

5 Resultados obtidos

As incertezas expandidas de medição relatadas nas tabelas contidas no item resultados obtidos, são declaradas como as incertezas padrão de medição multiplicadas pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com respectivo V_{eff} (graus de liberdade efetivos), corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Reproduções deste documento só tem validade se forem autorizadas pelo Laboratório de Calibração
Reproductions of this document are valid only with the permission of the Calibration Laboratory

CPQD – Todos os direitos reservados.
CPQD – All rights reserved.

Laboratório de Calibração



Laboratório de Calibração
PD.SM.11.22A.3986A/CC-01-AA

3 / 3

5.1 Resultado da Medição

Valor Nominal	VVC Aplicado	VVC Medido	Valor Correspondente ao Medido	Erro	Graus de Liberdade Efetivos	Fator de Abrangência k	Incerteza de Medição
[A]	[A]	[mV]	[A]	[%]	[-]	[-]	± [%]
5,0000	5,0448	5,0775	5,0775	0,65	∞	2,00	0,15
11,0000	11,0090	11,0803	11,0803	0,65	∞	2,00	0,15
16,0000	15,9981	16,1003	16,1003	0,64	∞	2,00	0,15
20,0000	20,0008	20,1304	20,1304	0,65	∞	2,00	0,15
30,0000	29,9783	30,1688	30,1688	0,64	∞	2,00	0,15
40,0000	40,0019	40,2544	40,2544	0,63	∞	2,00	0,16
50,0000	49,9867	50,2956	50,2956	0,62	∞	2,00	0,16
60,0000	59,9467	60,3283	60,3283	0,64	∞	2,00	0,16

6 Histórico de alterações

Data de início de vigência	Versão	Descrições das alterações realizadas
03/Out/2012	AA	Primeira versão aprovada.

Reproduções deste documento só tem validade se forem autorizadas pelo Laboratório de Calibração
Reproductions of this document are valid only with the permission of the Calibration Laboratory

CPqD – Todos os direitos reservados.
CPqD – All rights reserved.

Laboratório de Calibração

Anexo 2 – Tabela Distribuição D

CRITICAL VALUES OF D*

Sample size <i>n</i>	$D_{.10}$	$D_{.05}$	$D_{.01}$
1	0,950	0,975	0,995
2	0,776	0,842	0,929
3	0,642	0,708	0,828
4	0,564	0,624	0,733
5	0,510	0,565	0,669
6	0,470	0,521	0,618
7	0,438	0,486	0,577
8	0,411	0,457	0,543
9	0,388	0,432	0,514
10	0,368	0,410	0,490
11	0,352	0,391	0,468
12	0,338	0,375	0,450
13	0,325	0,361	0,433
14	0,314	0,349	0,418
15	0,304	0,338	0,404
16	0,295	0,328	0,392
17	0,286	0,318	0,381
18	0,278	0,309	0,371
19	0,272	0,301	0,363
20	0,264	0,294	0,356
25	0,24	0,27	0,32
30	0,22	0,24	0,29

*Adapted from F. J. Massey, Jr., “The Kolgomorov-Smirnov test for goodness of fit” *J. Amer. Statist. Ass.*, Vol. 46 (1951), p. 70, with the kind permission of the author and Publisher.

Anexo 3- Tabela de Distribuição F para $1-\alpha = 90\%$

$1 - \alpha = 0.9$
 $1 - \alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	61.815	61.883	61.945	62.002	62.055	62.103	62.148	62.189	62.229	62.265	62.529	62.688	62.794	62.871	62.927	62.972	63.007	63.167	63.264	63.296
2	9.444	9.446	9.448	9.450	9.451	9.453	9.454	9.456	9.457	9.458	9.466	9.471	9.475	9.477	9.479	9.480	9.481	9.486	9.489	9.490
3	5.182	5.180	5.178	5.176	5.175	5.173	5.172	5.170	5.169	5.168	5.160	5.155	5.151	5.149	5.147	5.145	5.144	5.139	5.136	5.135
4	3.841	3.837	3.834	3.831	3.828	3.826	3.823	3.821	3.819	3.817	3.804	3.795	3.790	3.786	3.782	3.780	3.778	3.769	3.764	3.762
5	3.202	3.198	3.194	3.191	3.187	3.184	3.181	3.179	3.176	3.174	3.157	3.147	3.140	3.135	3.132	3.129	3.126	3.116	3.109	3.107
6	2.831	2.827	2.822	2.818	2.815	2.811	2.808	2.805	2.803	2.800	2.781	2.770	2.762	2.756	2.752	2.749	2.746	2.734	2.727	2.725
7	2.589	2.584	2.580	2.575	2.571	2.568	2.564	2.561	2.558	2.555	2.535	2.523	2.514	2.508	2.504	2.500	2.497	2.484	2.476	2.473
8	2.419	2.414	2.409	2.404	2.400	2.396	2.392	2.389	2.386	2.383	2.361	2.348	2.339	2.333	2.328	2.324	2.321	2.307	2.298	2.295
9	2.292	2.287	2.282	2.277	2.272	2.268	2.265	2.261	2.258	2.255	2.232	2.218	2.208	2.202	2.198	2.192	2.189	2.174	2.165	2.162
10	2.194	2.189	2.183	2.178	2.174	2.170	2.166	2.162	2.159	2.155	2.132	2.117	2.107	2.100	2.095	2.090	2.087	2.071	2.062	2.059
11	2.117	2.111	2.105	2.100	2.095	2.091	2.087	2.083	2.080	2.076	2.052	2.036	2.026	2.019	2.013	2.009	2.005	1.989	1.979	1.975
12	2.053	2.047	2.041	2.036	2.031	2.027	2.022	2.019	2.015	2.011	1.986	1.970	1.960	1.952	1.946	1.942	1.938	1.921	1.911	1.907
13	2.000	1.994	1.988	1.983	1.978	1.973	1.969	1.965	1.961	1.958	1.931	1.915	1.904	1.896	1.890	1.886	1.882	1.864	1.853	1.850
14	1.955	1.949	1.943	1.938	1.933	1.928	1.923	1.919	1.916	1.912	1.885	1.869	1.857	1.849	1.843	1.838	1.834	1.816	1.805	1.801
15	1.917	1.911	1.905	1.899	1.894	1.889	1.885	1.880	1.876	1.873	1.845	1.828	1.817	1.808	1.802	1.797	1.793	1.774	1.763	1.759
16	1.884	1.877	1.871	1.866	1.860	1.855	1.851	1.847	1.843	1.839	1.811	1.793	1.782	1.773	1.766	1.761	1.757	1.738	1.726	1.722
17	1.855	1.848	1.842	1.836	1.831	1.826	1.821	1.817	1.813	1.809	1.781	1.763	1.751	1.742	1.735	1.730	1.726	1.706	1.694	1.690
18	1.829	1.823	1.816	1.810	1.805	1.800	1.795	1.791	1.787	1.783	1.754	1.736	1.723	1.714	1.707	1.702	1.698	1.678	1.665	1.661
19	1.807	1.800	1.793	1.787	1.782	1.777	1.772	1.767	1.763	1.759	1.730	1.711	1.699	1.690	1.683	1.677	1.673	1.652	1.639	1.635
20	1.786	1.779	1.773	1.767	1.761	1.756	1.751	1.746	1.742	1.738	1.708	1.690	1.677	1.667	1.660	1.655	1.650	1.629	1.616	1.612
21	1.768	1.761	1.754	1.748	1.742	1.737	1.732	1.728	1.723	1.719	1.689	1.670	1.657	1.647	1.640	1.634	1.630	1.608	1.595	1.591
22	1.751	1.744	1.737	1.731	1.726	1.720	1.715	1.711	1.706	1.702	1.671	1.652	1.639	1.629	1.622	1.616	1.611	1.590	1.576	1.571
23	1.736	1.729	1.722	1.716	1.710	1.705	1.700	1.695	1.691	1.686	1.655	1.636	1.622	1.613	1.605	1.599	1.594	1.572	1.558	1.554
24	1.722	1.715	1.708	1.702	1.696	1.691	1.686	1.681	1.676	1.672	1.641	1.621	1.607	1.597	1.590	1.584	1.579	1.556	1.542	1.538
25	1.710	1.702	1.695	1.689	1.683	1.678	1.672	1.668	1.663	1.659	1.627	1.607	1.593	1.583	1.576	1.569	1.565	1.542	1.527	1.523
26	1.698	1.690	1.683	1.677	1.671	1.666	1.660	1.656	1.651	1.647	1.615	1.594	1.581	1.570	1.562	1.556	1.551	1.528	1.514	1.509
27	1.687	1.680	1.673	1.666	1.660	1.655	1.649	1.645	1.640	1.636	1.603	1.583	1.569	1.558	1.550	1.544	1.539	1.515	1.501	1.496
28	1.677	1.669	1.662	1.656	1.650	1.644	1.639	1.634	1.630	1.625	1.592	1.572	1.558	1.547	1.539	1.533	1.528	1.504	1.489	1.484
29	1.668	1.660	1.653	1.647	1.640	1.635	1.630	1.625	1.620	1.616	1.583	1.562	1.547	1.537	1.529	1.522	1.517	1.493	1.478	1.472
30	1.659	1.651	1.644	1.638	1.632	1.626	1.621	1.616	1.611	1.606	1.573	1.552	1.538	1.527	1.519	1.512	1.507	1.482	1.467	1.462
40	1.596	1.588	1.581	1.574	1.568	1.562	1.556	1.551	1.546	1.541	1.506	1.483	1.467	1.455	1.447	1.439	1.434	1.406	1.389	1.383
50	1.559	1.551	1.543	1.536	1.529	1.523	1.517	1.512	1.507	1.502	1.465	1.441	1.424	1.412	1.402	1.395	1.388	1.359	1.340	1.333
60	1.534	1.526	1.518	1.511	1.504	1.498	1.492	1.486	1.481	1.476	1.437	1.413	1.395	1.382	1.372	1.364	1.358	1.326	1.306	1.299
70	1.517	1.508	1.500	1.493	1.486	1.479	1.473	1.467	1.462	1.457	1.418	1.392	1.374	1.361	1.350	1.342	1.335	1.302	1.281	1.273
80	1.503	1.495	1.487	1.479	1.472	1.465	1.459	1.453	1.448	1.443	1.403	1.377	1.358	1.344	1.334	1.325	1.318	1.284	1.261	1.253
90	1.493	1.484	1.476	1.468	1.461	1.455	1.448	1.442	1.437	1.432	1.391	1.365	1.346	1.332	1.321	1.312	1.304	1.269	1.245	1.237
100	1.485	1.476	1.468	1.460	1.453	1.446	1.440	1.434	1.428	1.423	1.382	1.355	1.336	1.321	1.310	1.301	1.293	1.257	1.232	1.223
200	1.448	1.438	1.430	1.422	1.414	1.407	1.400	1.394	1.388	1.383	1.339	1.310	1.289	1.273	1.261	1.250	1.242	1.199	1.168	1.157
500	1.425	1.416	1.407	1.399	1.391	1.384	1.377	1.370	1.364	1.358	1.313	1.282	1.260	1.243	1.229	1.218	1.209	1.160	1.122	1.106
1000	1.418	1.408	1.399	1.391	1.383	1.376	1.369	1.362	1.356	1.350	1.304	1.273	1.250	1.232	1.218	1.207	1.197	1.145	1.103	1.084

Anexo 4 – Tabela de Distribuição F para: $1-\alpha = 95\%$

$1 - \alpha = 0.95$
 $1 - \alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	248.307	248.579	248.823	249.052	249.260	249.453	249.631	249.798	249.951	250.098	251.144	251.774	252.196	252.498	252.723	252.898	253.043	253.676	254.062	254.186
2	19.448	19.450	19.452	19.454	19.456	19.457	19.459	19.460	19.461	19.463	19.471	19.476	19.479	19.481	19.483	19.485	19.486	19.491	19.494	19.495
3	8.654	8.648	8.643	8.638	8.634	8.630	8.626	8.623	8.620	8.617	8.594	8.581	8.572	8.566	8.561	8.557	8.554	8.540	8.532	8.529
4	5.795	5.787	5.781	5.774	5.769	5.763	5.759	5.754	5.750	5.746	5.717	5.699	5.688	5.679	5.673	5.668	5.664	5.646	5.635	5.632
5	4.549	4.541	4.534	4.527	4.521	4.515	4.510	4.505	4.500	4.496	4.464	4.444	4.431	4.422	4.415	4.409	4.405	4.385	4.373	4.369
6	3.865	3.856	3.849	3.841	3.835	3.829	3.823	3.818	3.813	3.808	3.774	3.754	3.740	3.730	3.722	3.716	3.712	3.690	3.678	3.673
7	3.435	3.426	3.418	3.410	3.404	3.397	3.391	3.386	3.381	3.376	3.340	3.319	3.304	3.294	3.286	3.280	3.275	3.252	3.239	3.234
8	3.140	3.131	3.123	3.115	3.108	3.102	3.095	3.090	3.084	3.079	3.043	3.020	3.005	2.994	2.986	2.980	2.975	2.951	2.937	2.932
9	2.926	2.917	2.908	2.900	2.893	2.886	2.880	2.874	2.869	2.864	2.826	2.803	2.787	2.776	2.768	2.761	2.756	2.731	2.717	2.712
10	2.764	2.754	2.745	2.737	2.730	2.723	2.716	2.710	2.705	2.700	2.661	2.637	2.621	2.609	2.601	2.594	2.588	2.563	2.548	2.543
11	2.636	2.626	2.617	2.609	2.601	2.594	2.588	2.582	2.576	2.570	2.531	2.507	2.490	2.478	2.469	2.462	2.457	2.431	2.415	2.410
12	2.533	2.523	2.514	2.505	2.498	2.491	2.484	2.478	2.472	2.466	2.426	2.401	2.384	2.372	2.363	2.356	2.350	2.323	2.307	2.302
13	2.448	2.438	2.429	2.420	2.412	2.405	2.398	2.392	2.386	2.380	2.339	2.314	2.297	2.284	2.275	2.267	2.261	2.234	2.218	2.212
14	2.377	2.367	2.357	2.349	2.341	2.333	2.326	2.320	2.314	2.308	2.266	2.241	2.223	2.210	2.201	2.193	2.187	2.159	2.142	2.136
15	2.316	2.306	2.297	2.288	2.280	2.272	2.265	2.259	2.253	2.247	2.204	2.178	2.160	2.147	2.137	2.130	2.123	2.095	2.078	2.072
16	2.264	2.254	2.244	2.235	2.227	2.220	2.212	2.206	2.200	2.194	2.151	2.124	2.106	2.093	2.083	2.075	2.068	2.039	2.022	2.016
17	2.219	2.208	2.199	2.190	2.181	2.174	2.167	2.160	2.154	2.148	2.104	2.077	2.058	2.045	2.035	2.027	2.020	1.991	1.973	1.967
18	2.179	2.168	2.159	2.150	2.141	2.134	2.126	2.119	2.113	2.107	2.063	2.035	2.017	2.003	1.993	1.985	1.978	1.948	1.929	1.923
19	2.144	2.133	2.123	2.114	2.106	2.098	2.090	2.084	2.077	2.071	2.026	1.999	1.980	1.966	1.955	1.947	1.940	1.910	1.891	1.884
20	2.112	2.102	2.092	2.082	2.074	2.066	2.059	2.052	2.045	2.039	1.994	1.966	1.946	1.932	1.922	1.913	1.907	1.875	1.856	1.850
21	2.084	2.073	2.063	2.054	2.045	2.037	2.030	2.023	2.016	2.010	1.965	1.936	1.916	1.902	1.891	1.883	1.876	1.845	1.825	1.818
22	2.059	2.048	2.038	2.028	2.020	2.012	2.004	1.997	1.990	1.984	1.938	1.909	1.889	1.875	1.864	1.856	1.849	1.817	1.797	1.790
23	2.036	2.025	2.014	2.005	1.996	1.988	1.981	1.973	1.967	1.961	1.914	1.885	1.865	1.850	1.839	1.830	1.823	1.791	1.771	1.764
24	2.015	2.003	1.993	1.984	1.975	1.967	1.959	1.952	1.945	1.939	1.892	1.863	1.842	1.828	1.816	1.808	1.800	1.768	1.747	1.740
25	1.995	1.984	1.974	1.964	1.955	1.947	1.939	1.932	1.926	1.919	1.872	1.842	1.822	1.807	1.796	1.787	1.779	1.746	1.725	1.718
26	1.978	1.966	1.956	1.946	1.938	1.929	1.921	1.914	1.907	1.901	1.853	1.823	1.803	1.788	1.776	1.767	1.760	1.726	1.705	1.698
27	1.961	1.950	1.940	1.930	1.921	1.913	1.905	1.898	1.891	1.884	1.836	1.806	1.785	1.770	1.758	1.749	1.742	1.708	1.686	1.679
28	1.946	1.935	1.924	1.915	1.906	1.897	1.889	1.882	1.875	1.869	1.820	1.790	1.769	1.754	1.742	1.733	1.725	1.691	1.669	1.662
29	1.932	1.921	1.910	1.901	1.891	1.883	1.875	1.868	1.861	1.854	1.806	1.775	1.754	1.738	1.726	1.717	1.710	1.675	1.653	1.645
30	1.919	1.908	1.897	1.887	1.878	1.870	1.862	1.854	1.847	1.841	1.792	1.761	1.740	1.724	1.712	1.703	1.695	1.660	1.637	1.630
40	1.826	1.814	1.803	1.793	1.783	1.775	1.766	1.759	1.751	1.744	1.693	1.660	1.637	1.621	1.608	1.597	1.589	1.551	1.526	1.517
50	1.771	1.759	1.748	1.737	1.727	1.718	1.710	1.702	1.694	1.687	1.634	1.599	1.576	1.558	1.544	1.534	1.525	1.484	1.457	1.448
60	1.735	1.722	1.711	1.700	1.690	1.681	1.672	1.664	1.656	1.649	1.594	1.559	1.534	1.516	1.502	1.491	1.481	1.438	1.409	1.399
70	1.709	1.696	1.685	1.674	1.664	1.654	1.646	1.637	1.629	1.622	1.566	1.530	1.505	1.486	1.471	1.459	1.450	1.404	1.374	1.364
80	1.689	1.677	1.665	1.654	1.644	1.634	1.626	1.617	1.609	1.602	1.545	1.508	1.482	1.463	1.448	1.436	1.426	1.379	1.347	1.336
90	1.675	1.662	1.650	1.639	1.629	1.619	1.610	1.601	1.593	1.586	1.528	1.491	1.465	1.445	1.429	1.417	1.407	1.358	1.326	1.314
100	1.663	1.650	1.638	1.627	1.616	1.607	1.598	1.589	1.581	1.573	1.515	1.477	1.450	1.430	1.415	1.402	1.392	1.342	1.308	1.296
200	1.609	1.596	1.583	1.572	1.561	1.551	1.542	1.533	1.524	1.516	1.456	1.415	1.386	1.364	1.346	1.332	1.321	1.263	1.221	1.205
500	1.577	1.563	1.551	1.539	1.528	1.518	1.508	1.499	1.490	1.482	1.419	1.376	1.345	1.322	1.303	1.288	1.275	1.210	1.159	1.138
1000	1.566	1.553	1.540	1.528	1.517	1.507	1.497	1.488	1.479	1.471	1.406	1.363	1.332	1.308	1.289	1.273	1.260	1.190	1.134	1.110

Anexo 5 – Tabela de Distribuição F para: $1-\alpha = 99\%$

$1 - \alpha = 0.99$
 $1 - \alpha = P (F \leq f_{\alpha, v_1, v_2})$

$v_2 \backslash v_1$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	40	50	60	70	80	90	100	200	500	1000
1	6216.113	6223.097	6228.685	6234.273	6239.861	6244.518	6249.174	6252.900	6257.091	6260.350	6286.427	6302.260	6312.970	6320.886	6326.474	6330.665	6333.925	6349.757	6359.536	6362.796
2	99.451	99.455	99.455	99.455	99.459	99.462	99.462	99.462	99.462	99.466	99.477	99.477	99.484	99.484	99.484	99.488	99.491	99.491	99.499	99.499
3	26.664	26.639	26.617	26.597	26.579	26.562	26.546	26.531	26.517	26.504	26.411	26.354	26.316	26.289	26.269	26.253	26.241	26.183	26.148	26.137
4	13.994	13.970	13.949	13.929	13.911	13.894	13.878	13.864	13.850	13.838	13.745	13.690	13.652	13.626	13.605	13.590	13.577	13.520	13.486	13.475
5	9.528	9.506	9.485	9.466	9.449	9.433	9.418	9.404	9.391	9.379	9.291	9.238	9.202	9.176	9.157	9.142	9.130	9.075	9.042	9.032
6	7.372	7.351	7.331	7.313	7.296	7.281	7.266	7.253	7.240	7.229	7.143	7.091	7.057	7.032	7.013	6.998	6.987	6.934	6.901	6.891
7	6.132	6.111	6.092	6.074	6.058	6.043	6.029	6.016	6.003	5.992	5.908	5.858	5.824	5.799	5.781	5.766	5.755	5.702	5.671	5.660
8	5.336	5.316	5.297	5.279	5.263	5.248	5.234	5.221	5.209	5.198	5.116	5.065	5.032	5.007	4.989	4.975	4.963	4.911	4.880	4.869
9	4.786	4.765	4.746	4.729	4.713	4.698	4.684	4.672	4.660	4.649	4.567	4.517	4.483	4.459	4.441	4.426	4.415	4.363	4.332	4.321
10	4.383	4.363	4.344	4.327	4.311	4.296	4.283	4.270	4.258	4.247	4.165	4.115	4.082	4.058	4.039	4.025	4.014	3.962	3.930	3.920
11	4.077	4.057	4.038	4.021	4.005	3.990	3.977	3.964	3.952	3.941	3.860	3.810	3.776	3.752	3.734	3.719	3.708	3.656	3.624	3.613
12	3.836	3.816	3.798	3.780	3.765	3.750	3.736	3.724	3.712	3.701	3.619	3.569	3.535	3.511	3.493	3.478	3.467	3.414	3.382	3.372
13	3.643	3.622	3.604	3.587	3.571	3.556	3.543	3.530	3.518	3.507	3.425	3.375	3.341	3.317	3.298	3.284	3.272	3.219	3.187	3.176
14	3.483	3.463	3.444	3.427	3.412	3.397	3.383	3.371	3.359	3.348	3.266	3.215	3.181	3.157	3.138	3.124	3.112	3.059	3.026	3.015
15	3.350	3.330	3.311	3.294	3.278	3.264	3.250	3.237	3.225	3.214	3.132	3.081	3.047	3.022	3.004	2.989	2.977	2.923	2.891	2.880
16	3.237	3.216	3.198	3.181	3.165	3.150	3.137	3.124	3.112	3.101	3.018	2.967	2.933	2.908	2.889	2.875	2.863	2.808	2.775	2.764
17	3.139	3.119	3.101	3.083	3.068	3.053	3.039	3.026	3.014	3.003	2.920	2.869	2.835	2.810	2.791	2.776	2.764	2.709	2.676	2.664
18	3.055	3.035	3.016	2.999	2.983	2.968	2.955	2.942	2.930	2.919	2.835	2.784	2.749	2.724	2.705	2.690	2.678	2.623	2.589	2.577
19	2.981	2.961	2.942	2.925	2.909	2.894	2.880	2.868	2.855	2.844	2.761	2.709	2.674	2.649	2.630	2.614	2.602	2.547	2.512	2.501
20	2.916	2.895	2.877	2.859	2.843	2.829	2.815	2.802	2.790	2.778	2.695	2.643	2.608	2.582	2.563	2.548	2.535	2.479	2.445	2.433
21	2.857	2.837	2.818	2.801	2.785	2.770	2.756	2.743	2.731	2.720	2.636	2.584	2.548	2.522	2.503	2.488	2.476	2.419	2.384	2.372
22	2.805	2.785	2.766	2.749	2.733	2.718	2.704	2.691	2.679	2.667	2.583	2.531	2.495	2.469	2.450	2.434	2.422	2.365	2.329	2.317
23	2.758	2.738	2.719	2.702	2.686	2.671	2.657	2.644	2.632	2.620	2.536	2.483	2.447	2.421	2.401	2.386	2.373	2.316	2.280	2.268
24	2.716	2.695	2.676	2.659	2.643	2.628	2.614	2.601	2.589	2.577	2.492	2.440	2.403	2.377	2.357	2.342	2.329	2.271	2.235	2.223
25	2.677	2.657	2.638	2.620	2.604	2.589	2.575	2.562	2.550	2.538	2.453	2.400	2.364	2.337	2.317	2.302	2.289	2.230	2.194	2.182
26	2.642	2.621	2.602	2.585	2.569	2.554	2.540	2.526	2.514	2.503	2.417	2.364	2.327	2.301	2.281	2.265	2.252	2.193	2.156	2.144
27	2.609	2.589	2.570	2.552	2.536	2.521	2.507	2.494	2.481	2.470	2.384	2.330	2.294	2.267	2.247	2.231	2.218	2.159	2.122	2.109
28	2.579	2.559	2.540	2.522	2.506	2.491	2.477	2.464	2.451	2.440	2.354	2.300	2.263	2.236	2.216	2.200	2.187	2.127	2.090	2.077
29	2.552	2.531	2.512	2.495	2.478	2.463	2.449	2.436	2.423	2.412	2.325	2.271	2.234	2.207	2.187	2.171	2.158	2.097	2.060	2.047
30	2.526	2.506	2.487	2.469	2.453	2.437	2.423	2.410	2.398	2.386	2.299	2.245	2.208	2.181	2.160	2.144	2.131	2.070	2.032	2.019
40	2.346	2.325	2.306	2.288	2.271	2.256	2.241	2.228	2.215	2.203	2.114	2.058	2.019	1.991	1.969	1.952	1.938	1.874	1.833	1.819
50	2.242	2.221	2.202	2.183	2.167	2.151	2.136	2.123	2.110	2.098	2.007	1.949	1.909	1.880	1.857	1.839	1.825	1.757	1.713	1.698
60	2.175	2.153	2.134	2.115	2.098	2.083	2.068	2.054	2.041	2.028	1.936	1.877	1.836	1.806	1.783	1.764	1.749	1.678	1.633	1.617
70	2.127	2.106	2.086	2.067	2.050	2.034	2.019	2.005	1.992	1.980	1.886	1.826	1.785	1.754	1.730	1.711	1.695	1.622	1.574	1.558
80	2.092	2.070	2.050	2.032	2.015	1.999	1.983	1.969	1.956	1.944	1.849	1.788	1.746	1.714	1.690	1.671	1.655	1.579	1.530	1.512
90	2.065	2.043	2.023	2.004	1.987	1.971	1.955	1.942	1.929	1.916	1.820	1.759	1.716	1.684	1.659	1.639	1.623	1.546	1.494	1.476
100	2.043	2.021	2.001	1.983	1.965	1.949	1.934	1.919	1.906	1.893	1.797	1.735	1.692	1.659	1.634	1.614	1.598	1.518	1.466	1.447
200	1.947	1.925	1.905	1.886	1.868	1.851	1.836	1.821	1.807	1.794	1.694	1.629	1.583	1.548	1.521	1.499	1.481	1.391	1.328	1.304
500	1.891	1.869	1.848	1.829	1.810	1.794	1.778	1.763	1.749	1.735	1.633	1.566	1.517	1.481	1.452	1.428	1.408	1.308	1.232	1.201
1000	1.872	1.850	1.829	1.810	1.791	1.774	1.758	1.743	1.729	1.716	1.613	1.544	1.495	1.458	1.428	1.404	1.383	1.278	1.195	1.159

Anexo 6 – Tabela Distribuição Normal (Área 0 a +∞)

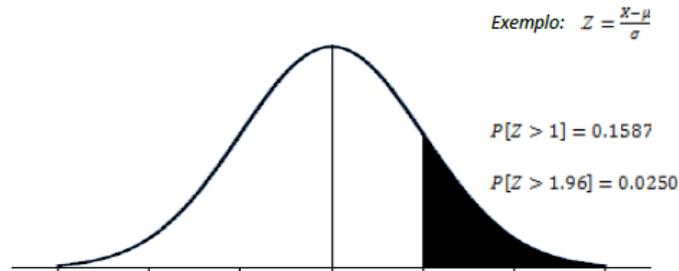
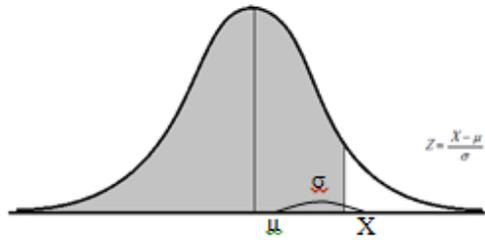


TABELA NORMAL

Desv. Normal z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

Anexo 7 – Tabela Distribuição Normal (Área $-\infty$ a 0)



z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0.00	0.5000	0.62	0.7324	1.24	0.8925	1.86	0.9686
0.02	0.5080	0.64	0.7389	1.26	0.8962	1.88	0.9699
0.04	0.5160	0.66	0.7454	1.28	0.8997	1.90	0.9713
0.06	0.5239	0.68	0.7517	1.30	0.9032	1.92	0.9726
0.08	0.5319	0.70	0.7580	1.32	0.9066	1.94	0.9738
0.10	0.5398	0.72	0.7642	1.34	0.9099	1.96	0.9750
0.12	0.5478	0.74	0.7704	1.36	0.9131	1.98	0.9761
0.14	0.5557	0.76	0.7764	1.38	0.9162	2.00	0.9772
0.16	0.5636	0.78	0.7823	1.40	0.9192	2.02	0.9783
0.18	0.5714	0.80	0.7881	1.42	0.9222	2.04	0.9793
0.20	0.5793	0.82	0.7939	1.44	0.9251	2.06	0.9803
0.22	0.5871	0.84	0.7995	1.46	0.9279	2.08	0.9812
0.24	0.5948	0.86	0.8051	1.48	0.9306	2.10	0.9821
0.26	0.6026	0.88	0.8106	1.50	0.9332	2.12	0.9830
0.28	0.6103	0.90	0.8159	1.52	0.9357	2.14	0.9838
0.30	0.6179	0.92	0.8212	1.54	0.9382	2.16	0.9846
0.32	0.6255	0.94	0.8264	1.56	0.9406	2.18	0.9854
0.34	0.6331	0.96	0.8315	1.58	0.9429	2.20	0.9861
0.36	0.6406	0.98	0.8365	1.60	0.9452	2.22	0.9868
0.38	0.6480	1.00	0.8413	1.62	0.9474	2.24	0.9875
0.40	0.6554	1.02	0.8461	1.64	0.9495	2.26	0.9881
0.42	0.6628	1.04	0.8508	1.66	0.9515	2.28	0.9887
0.44	0.6700	1.06	0.8554	1.68	0.9535	2.30	0.9893
0.46	0.6772	1.08	0.8599	1.70	0.9554	2.32	0.9898
0.48	0.6844	1.10	0.8643	1.72	0.9573	2.34	0.9904
0.50	0.6915	1.12	0.8686	1.74	0.9591	2.36	0.9909
0.52	0.6985	1.14	0.8729	1.76	0.9608	2.38	0.9913
0.54	0.7054	1.16	0.8770	1.78	0.9625	2.40	0.9918
0.56	0.7123	1.18	0.8810	1.80	0.9641	2.42	0.9922
0.58	0.7190	1.20	0.8849	1.82	0.9656	2.44	0.9927
0.60	0.7257	1.22	0.8888	1.84	0.9671	2.46	0.9931