



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

Gabriel Pereira Fernandes

**METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE PLACAS DE AQUISIÇÃO ANALÓGICA  
DE *MERGING UNITS* USANDO *SAMPLED VALUES***

Florianópolis  
2021



Gabriel Pereira Fernandes

**METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE PLACAS DE AQUISIÇÃO ANALÓGICA  
DE *MERGING UNITS* USANDO *SAMPLED VALUES***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.  
**Orientador(a):** Miguel Moreto, Dr.

Florianópolis  
2021

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina.  
Arquivo compilado às 15:16h do dia 29 de julho de 2021.

Gabriel Pereira Fernandes

Metodologia para calibração de placas de aquisição analógica de Merging Units usando Sampled Values / Gabriel Pereira Fernandes; Orientador(a), Miguel Moreto, Dr. - Florianópolis , 22 de julho de 2021.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, EEL - Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, CTC - Centro Tecnológico, Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica.

Inclui referências

1. Sistemas de Potência, 2. Merging Unit, 3. Métodos de Calibração, 4. Algoritmos de Linearização, I. Miguel Moreto, Dr. II. Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica III. Metodologia para calibração de placas de aquisição analógica de Merging Units usando Sampled Values

CDU 02:141:005.7

Gabriel Pereira Fernandes

**METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE PLACAS DE AQUISIÇÃO ANALÓGICA  
DE *MERGING UNITS* USANDO *SAMPLED VALUES***

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado(a) para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, e foi aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do EEL – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, CTC – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis , 22 de julho de 2021.

---

**Fernando Rangel de Sousa, Dr.**  
Coordenador(a) do Curso de Graduação  
em Engenharia Eletrônica

**Banca Examinadora:**

---

**Miguel Moreto, Dr.**  
Orientador(a)  
Universidade Federal de Santa  
Catarina – UFSC

---

**Antonio Felipe Da Cunha De Aquino, Dr.**  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC

---

**Heitor José Tessaro, Me.**  
Universidade Federal de Santa Catarina –  
UFSC

## **AGRADECIMENTOS**

Os principais agradecimentos deste trabalho são direcionados aos meus pais, Luiz e Rosinete, e minha irmã, Laiana, por nunca terem me deixado desistir dos meus sonhos. Agradecimentos especiais ao orientador Miguel Moreto, pelo incentivo e direcionamento excepcionais, e aos colegas e amigos da Reason, em especial a Elias Bencz e Hector De La Hoz pelas valiosas conversas técnicas e filosóficas. Por fim, agradecimentos a todos os amigos que vida me trouxe e que fez questão de manter: foram os sorrisos que vocês trouxeram que permitiram a execução deste trabalho.

*"I have not failed. I've just found 10,000 ways that won't work."*

Thomas Alva Edison

## RESUMO

No contexto das subestações elétricas digitais, as *Merging Units* cumprem um importante papel na interface entre os transformadores de instrumentação e os *Intelligent Electronic Devices*, IEDs. De forma a manter essa interface o mais fiel possível aos sinais de tensão e corrente recebidos dos transformadores, se faz necessário que os pacotes criados e transmitidos pelas *Merging Units* possuam um erro mínimo. Dessa forma, este trabalho propõe uma metodologia de calibração para as placas de aquisição analógica para estes equipamentos, de modo a reduzir os erros de magnitude dos sinais adquiridos e manter os canais de aquisição da *Merging Unit* dentro dos máximos permitidos pelo fabricante. Utilizando diferentes tipos de calibração, conseguiu-se resultados suficientes para manter o equipamento dentro das suas especificações em todos os canais de corrente com uma boa margem. Nos canais de tensão, os resultados não foram capazes de manter abaixo dos máximos fornecidos pelo fabricante, o que acusa uma não-linearidade expressiva nesse tipo interface. Para este caso, calibrações de ordens maiores foram propostas como solução posterior.

**Palavras-chaves:** Sistemas de Potência. Merging Unit. Métodos de Calibração. Algoritmos de Linearização.

## ABSTRACT

In the Digital Substations context, the Merging Units have a key role in the interface between the instrumentation transformers and the Intelligent Electronic Devices (IEDs). Aiming to keep the high fidelity of this interface regarding the current and voltage signals received from the transformers, the packets created and transmitted by the Merging Units should have minimal errors. Thus, this work proposes a calibration methodology for the analog acquisition boards of this devices, intending to reduce the magnitude errors and keep the acquisition channels within the maximum ratings provided by the manufacturer. Using different types of calibration methods, it was possible to obtain good results for the current channels with a reduced error margin. However, for the voltage channels, the results were not good enough to keep the errors below the maximum allowed by the manufacturer, what shows an expressive non-linearity in this type of interface. For this case, higher order calibrations were proposed as further studies.

**Keywords:** Power Systems. Merging Unit. Calibration Methods. Linearization Algorithms.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diagrama de uma Subestação Elétrica Digital aderente à norma IEC-61850 . . . . .	15
Figura 2	– Representação gráfica da linearização por mínimos quadrados ordinários . . . . .	18
Figura 3	– Amostras com variância constante (azul) e amostras com variância não-constante (vermelho) . . . . .	22
Figura 4	– Linhas regressoras para o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e para o método dos Mínimos Quadrados Ponderados(MQP) . . . . .	24
Figura 5	– Influência de um <i>outlier</i> na estimação dos valores de $y$ utilizando mínimos quadrados . . . . .	25
Figura 6	– Linearização utilizando o método de desvios mínimos absolutos .	27
Figura 7	– Exemplo de utilização de uma <i>Merging Unit</i> em uma subestação elétrica digital . . . . .	29
Figura 8	– Ambiente em laboratório para aquisição de dados com <i>Merging Unit</i>	30
Figura 9	– Exemplo de oscilografia construída a partir de COMTRADE. . . .	32
Figura 10	– Diagrama dos procedimentos descritos na seção de aplicação dos métodos de calibração e avaliação dos resultados. . . . .	33
Figura 11	– Reta ajustada utilizando o método de Mínimos Quadrados Ordinários utilizando como sinais de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao sinal aplicado para o canal IA . . . . .	38
Figura 12	– Reta ajustada utilizando o método de Mínimos Quadrados Ponderados utilizando como sinais de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao sinal aplicado para o canal IA . . . . .	41
Figura 13	– Reta ajustada utilizando o método de Mínimos Desvios Absolutos utilizando como sinais de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao sinal aplicado para o canal IA . . . . .	44
Figura 14	– Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de corrente com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA) em 60 Hz . . . . .	47
Figura 15	– Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA). . . . .	48

Figura 16	–	Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de corrente com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA) em 50 Hz . . . . .	49
Figura 17	–	Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão em 50 Hz com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA). . . . .	50
Figura 18	–	Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão com maior erro por ciclo em 60 Hz após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA), todos em segunda ordem. . . . .	51
Figura 19	–	Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão com maior erro por ciclo em 50 Hz após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA), todos em segunda ordem. . . . .	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Exemplo do arquivo de configuração do COMTRADE . . . . .	30
Quadro 2	–	Exemplo de uma linha do arquivo de dados do COMTRADE . .	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Especificações de Corrente de entrada para a placa de aquisição utilizada. . . . .	34
Tabela 2	– Especificações de Tensão de entrada para a placa de aquisição utilizada. . . . .	34
Tabela 3	– Sinais de corrente em 60Hz aplicados do canal de corrente IA e os erros observados no COMTRADE gerado . . . . .	36
Tabela 4	– Sinais de tensão em 60Hz aplicados do canal de tensão VC e os erros observados no COMTRADE gerado . . . . .	36
Tabela 5	– Sinais de corrente em 50Hz aplicados do canal de corrente IA e os erros observados no COMTRADE gerado . . . . .	37
Tabela 6	– Sinais de tensão em 50Hz aplicados do canal de tensão VC e os erros observados no COMTRADE gerado . . . . .	37
Tabela 7	– Sinais de corrente em 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários . . . . .	38
Tabela 8	– Sinais de tensão em 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários . . . . .	39
Tabela 9	– Sinais de corrente em 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários . . . . .	40
Tabela 10	– Sinais de tensão em 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários . . . . .	40
Tabela 11	– Coeficientes $R^2$ para a linearização por Mínimos Quadrados Ordinários . . . . .	41
Tabela 12	– Sinais de corrente com frequência de 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	42
Tabela 13	– Sinais de tensão com frequência de 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	42
Tabela 14	– Sinais de corrente com frequência de 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	43
Tabela 15	– Sinais de tensão com frequência de 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	43
Tabela 16	– Coeficientes $R^2$ para a linearização por Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	44
Tabela 17	– Sinais de corrente com 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos . . . . .	45
Tabela 18	– Sinais de tensão com 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos . . . . .	45
Tabela 19	– Sinais de corrente com 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos . . . . .	46

Tabela 20	– Sinais de tensão com 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos . . . . .	46
Tabela 21	– Média dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de corrente IA em 60 Hz. . . . .	47
Tabela 22	– Média dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 60 Hz. . . . .	48
Tabela 23	– Média dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de corrente IA em 50 Hz. . . . .	50
Tabela 24	– Médias dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 50 Hz. . . . .	50
Tabela 25	– Médias dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 60 Hz após as calibrações em segunda ordem. . . . .	52
Tabela 26	– Médias dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 50 Hz após as calibrações em segunda ordem. . . . .	53

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS . . . . .	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	16
<b>2</b>	<b>ALGORITMOS DE CALIBRAÇÃO UTILIZADOS</b> . . . . .	<b>17</b>
2.1	LINEARIZAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS - <i>ORDINARY LEAST SQUARES</i> . . . . .	17
2.2	LINEARIZAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS - <i>WEIGHTED LEAST SQUARES</i> . . . . .	21
2.3	LINEARIZAÇÃO POR DESVIOS MÍNIMOS ABSOLUTOS - <i>LEAST ABSOLUTE DEVIATIONS</i> . . . . .	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>29</b>
3.1	AMBIENTE DE TESTES . . . . .	29
3.2	GERAÇÃO DE SINAIS E AQUISIÇÃO PELA <i>MERGING UNIT</i> . . . . .	31
3.3	RECEBIMENTO DOS PACOTES DE <i>SAMPLED VALUES</i> E RE- CONSTRUÇÃO DOS SINAIS APLICADOS . . . . .	31
3.4	CÁLCULO DOS ERROS DE MAGNITUDE DOS SINAIS RECONS- TRUÍDOS . . . . .	32
3.5	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS . . . . .	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>34</b>
4.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS . . . . .	34
4.2	SINAIS APLICADOS . . . . .	35
4.3	ERROS ANTES DAS CALIBRAÇÕES . . . . .	35
4.4	MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS . . . . .	38
4.5	MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS . . . . .	41
4.6	MÍNIMOS DESVIOS ABSOLUTOS . . . . .	44
4.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . . .	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>56</b>

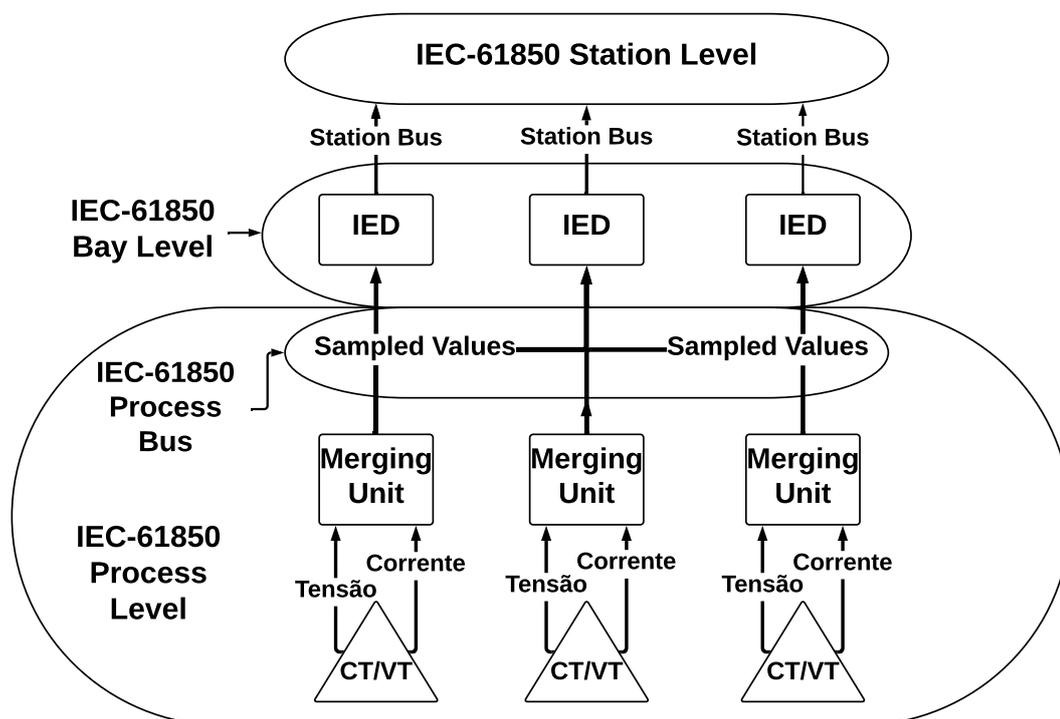
## 1 INTRODUÇÃO

Um dos marcos mais importantes na linha evolutiva das subestações elétricas foi a digitalização dos dados de medição e proteção oriundos dos transformadores de instrumentação, bem como a própria digitalização de todas as redes de controle e monitoração. A partir deste momento, as redes de comunicação entre os equipamentos da subestação deixaram de ser totalmente analógicas e foram substituídas gradativamente por protocolos digitais que trazem maior robustez, confiabilidade e segurança. Da mesma forma, os sinais de corrente e tensão vindos dos transformadores de instrumentação também passaram a ser discretizados e amostrados em pacotes, seguindo normas internacionais de estrutura, precisão e organização. As subestações que possuem estas características implementadas são chamadas de Subestações Elétricas Digitais.

Neste contexto, as *Merging Units* são equipamentos essenciais para a interface entre os transformadores de instrumentação e os IEDs (*Intelligent Electronic Devices*), como relés de proteção, gravadores digitais (*Digital Recorders*) e localizadores de falhas (*Fault Locators*). Estes equipamentos são responsáveis pela “ponte” entre a parte analógica e a parte digital de uma subestação elétrica. A figura 1 mostra a composição de uma subestação elétrica digital segundo a norma IEC-61850 (IEC, 2020a), onde é possível localizar as *Merging Units* ocupando uma posição fundamental não só para o Nível de Processos (*Process Level*) da subestação, mas também para o funcionamento adequado de todo o sistema, transmitindo as informações adquiridas dos transformadores para os IEDs através do Barramento de Processos (*Process Bus*), por onde as *Merging Units* se comunicam com o restante da subestação.

Na captura dos sinais de tensão e corrente advindos dos transformadores, os erros máximos de magnitude expostos na documentação do fabricante devem ser respeitados ao longo de toda a faixa de aquisição do equipamento. Uma vez que estes erros máximos não são garantidos apenas pelo projeto de *hardware* do equipamento, a motivação deste trabalho surge da necessidade de calibração das placas de aquisição analógica de corrente e tensão das *Merging Units*. Nesta esfera, a norma IEC 61850-7-2 (IEC, 2020a) traz os *Sampled Values* como protocolo padrão para os pacotes que carregam as informações oriundas dos sinais elétricos aplicados na *Merging Unit* e é através destes que este trabalho pretende calcular os ganhos e *offsets* necessários para manter os canais de aquisição de tensão e corrente dentro das especificações propostas pelo fabricante, também em consonância com o que é proposto pela norma IEC 61869-13 (IEC, 2021).

Figura 1 – Diagrama de uma Subestação Elétrica Digital aderente à norma IEC-61850



Fonte: o autor.

## 1.1 OBJETIVOS

Com este plano de fundo, este trabalho tem como objetivo geral propor uma metodologia de calibração para as placas de aquisição analógica de *Merging Units*, de forma a reduzir os erros de magnitude das leituras e adequar os canais aos padrões pré-estabelecidos.

Para atender ao objetivo geral, podem ser elencados os seguintes objetivos específicos:

- Captura e processamento dos pacotes de *Sampled Values* (IEC, 2020b) gerados pela *Merging Unit* a partir de sinais de corrente e tensão aplicados nos seus canais de aquisição analógica;
- Conversão dos pacotes *Sampled Values* em arquivos *COMTRADE* (IEEE, 1992) e avaliação dos seus erros em relação ao sinal aplicado antes das calibrações; Implementação dos métodos de calibração;
- Utilização dos *COMTRADEs* gerados como entrada para os métodos de calibração, de forma a obter como saída os coeficientes de linearização;
- Aplicação dos coeficientes nos *COMTRADEs*, a fim de avaliar os resultados de cada um dos métodos.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em três capítulos: o primeiro introduz cada um dos métodos utilizados para a calibração dos canais de aquisição analógica da *Merging Unit*, mostrando seus equacionamentos, vantagens e desvantagens. O segundo capítulo mostra como a metodologia proposta neste trabalho, utilizando os métodos do primeiro capítulo, é utilizada para obter os coeficientes de calibração para os canais de corrente e de tensão. Por sua vez, o terceiro capítulo mostra os resultados da aplicação da metodologia de calibração proposta em uma *Merging Unit* real, utilizando sinais em 50 Hz e 60 Hz.

## 2 ALGORITMOS DE CALIBRAÇÃO UTILIZADOS

### 2.1 LINEARIZAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS - *ORDINARY LEAST SQUARES*

Este primeiro método baseia-se no princípio dos mínimos quadrados para obtenção dos parâmetros desconhecidos (ou coeficientes) de um modelo de regressão linear: minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados em determinado conjunto de dados e os valores preditos pela função linear da variável independente.

De forma geométrica, este método pode ser visto como a soma das distâncias ao quadrado entre cada ponto no grupo de dados adquiridos e o seu ponto correspondente na função de regressão. Quanto menor essa distância, melhor o modelo se ajusta aos dados.

Para compreender o método matematicamente, partimos da definição de regressão linear, pois este conceito é importante não apenas para o método de Mínimos quadrados ordinários, mas para a compreensão de todos os outros métodos citados neste trabalho: regressão linear é um modelo estatístico utilizado para estimar o valor esperado de uma variável  $y$ , dados os valores de outras variáveis  $x$ , através da seguinte fórmula (STOCK; WATSON, 2006):

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i \quad (1)$$

Onde  $y$  é a variável a ser estimada,  $x$  é a variável que deverá ser capaz de estimar  $y$ ,  $\alpha$  é o parâmetro independente de  $x$ ,  $\beta$  é o coeficiente da variável  $x$  e  $\epsilon_i$  é o vetor de erros ou variações de  $y$ . No caso em estudo, onde existem  $n$  amostras a serem utilizadas nessa linearização,  $x$  e  $y$  serão vetores de tamanho  $n$ .

Graficamente, essa linearização pode ser exemplificada pela figura 2, que ilustra cada um dos termos da equação, bem como a própria linha regressora:

Matricialmente, a equação 1 pode ser exposta da forma:

$$\mathbf{Y} = \alpha + \mathbf{X}\beta + \epsilon$$

Onde  $\mathbf{Y}$  representa o vetor de valores a serem estimados,  $\mathbf{X}$  representa o vetor de dados observados,  $\beta$  e  $\alpha$  os coeficientes dependentes e independentes respectivamente, e  $\epsilon$  um vetor ou matriz de erros com variâncias constantes, da forma:

$$\begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{pmatrix}$$

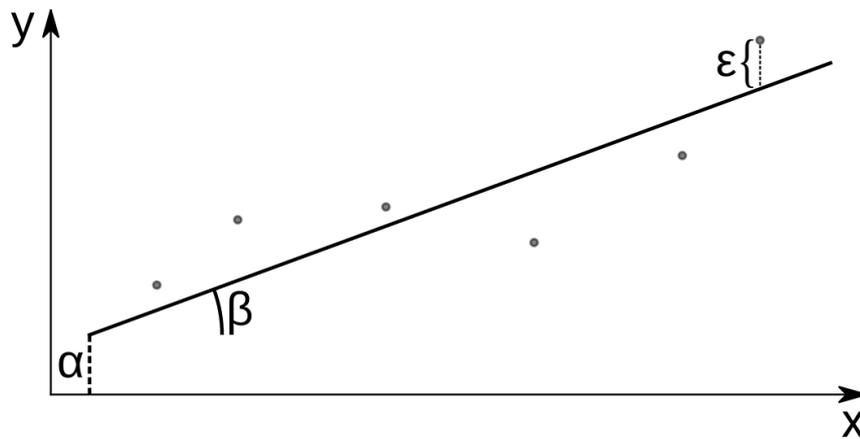


Figura 2 – Representação gráfica da linearização por mínimos quadrados ordinários

O objetivo do método de mínimos quadrados ordinários é encontrar as estimativas de  $\beta$  e  $\alpha$  e isto é feito a partir da minimização da soma dos quadrados dos erros  $\epsilon_i$ , ou seja:

$$\beta = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (2)$$

A ideia por trás dessa técnica é que, minimizando a soma do quadrado dos erros, sejam obtidos  $\beta$  e  $\alpha$  que trarão a menor diferença entre a estimativa de  $y$  e o valor de  $y$  realmente observado.

Para prosseguir no desenvolvimento do método, é substituído  $\epsilon_i$  por  $y_i - \alpha - \beta x_i$ , da forma:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (3)$$

A minimização ocorre com a derivação via regra da cadeia de  $S(\alpha, \beta)$  em relação à  $\alpha$  e  $\beta$  e igualando esse resultado a zero, como é mostrado abaixo:

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = \frac{\partial S}{\partial x_i} * \frac{\partial x_i}{\partial \alpha}$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial \alpha} = -1$$

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \alpha - \beta x_i) = 0 \quad (5)$$

Dividindo a equação 4 por  $2n$ , é obtido:

$$-\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \alpha}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \beta x_i}{n} = 0$$

Que pode ser reescrito da forma:

$$-\bar{y} + \alpha + \beta \bar{x} = 0$$

$$\bar{y} = \alpha + \beta \bar{x} \quad (6)$$

Onde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  representam as médias amostrais de  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Substituindo esse resultado na equação 5:

$$-2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y} + \beta \bar{x} - \beta x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n [x_i (y_i - \bar{y}) + x_i \beta (\bar{x} - x_i)] = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y}) + \beta \sum_{i=1}^n x_i (\bar{x} - x_i) = 0$$

Isolando  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n x_i (\bar{x} - x_i)} \quad (7)$$

Após o cálculo de  $\beta$ , basta reorganizar a equação 6 para obter  $\alpha$ :

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (8)$$

Para a obtenção de resultados ótimos utilizando este método, algumas premissas devem ser consideradas:

- Os regressores  $x$  devem ser fixos, isto é, o vetor  $X$  não deve ser estocástico;
- O erro deve ser aleatório e com média igual à zero, ou seja:  $E(\epsilon) = 0$ ;
- O erro deve ser distribuído conforme a curva normal;
- Não deve haver correlação entre os erros das amostras;

- A variância do erro deverá ser constante, isto é, as variáveis deverão ser homoscedásticas;
- Os parâmetros desconhecidos  $\alpha$  e  $\beta$  deverão ser constantes;
- Os dados da variável dependente  $y$  deverão ser gerados pela função linear  $y = X\beta + \alpha + \epsilon$ ;

Uma das principais medidas de qualidade deste método em relação à sua capacidade de estimar corretamente os valores de  $y$  é o coeficiente de determinação  $R^2$  (STOCK; WATSON, 2006) (DODGE, 2008). A equação para obtenção deste coeficiente é vista abaixo:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i(\beta x_i + \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

$R^2$  varia de 0 a 1 e quanto mais próximo de 1, melhor o método estima os valores de  $y$ .

A equação 1 refere-se ao ajuste do conjunto de pontos em uma reta, isto é: uma equação de primeira ordem. Para ajustes de ordem maior, deve-se proceder como é exposto a seguir, de forma generalizada para uma ordem  $k$ -ésima:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k + \epsilon \quad (10)$$

Raciocinando como na 3, obtém-se:

$$S(a_0, \dots, a^k) = \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)]^2 \quad (11)$$

Minimizando através da derivação parcial de  $S(a_0, \dots, a^k)$ , consegue-se:

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k)] = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x + \dots + a_kx^k)] x = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = -2 \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)] x_i^k = 0 \quad (14)$$

O que nos leva para as equações:

$$a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^k = \sum_{i=1}^n y_i \quad (15)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (16)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^n x_i^k + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \dots + a_k \sum_{i=1}^n x_i^{2k} = \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \quad (17)$$

Para melhor visualização, estas equações são reorganizadas de forma matricial como se segue:

$$\begin{pmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^k \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k & \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^k y_i \end{pmatrix} \quad (18)$$

Utilizando dados o conjunto de pontos  $(x_i, y_i)$  e ajustando com os coeficientes  $a_0, \dots, a_k$ , obtém-se:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^k \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} \quad (19)$$

Utilizando a notação matricial, a equação para este ajuste é dada por:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \mathbf{a} \quad (20)$$

Onde  $\mathbf{a}$  passa a representar o vetor de  $k + 1$  coeficientes.

Essa equação pode ser, por fim, resolvida para  $\mathbf{a}$  através da multiplicação pela transposta  $\mathbf{X}^T$ :

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (21)$$

## 2.2 LINEARIZAÇÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS - *WEIGHTED LEAST SQUARES*

Uma das pressuposições do modelo de linearização por mínimos quadrados ordinários é que a variância do erro entre as amostras deve ser constante, isto é, que

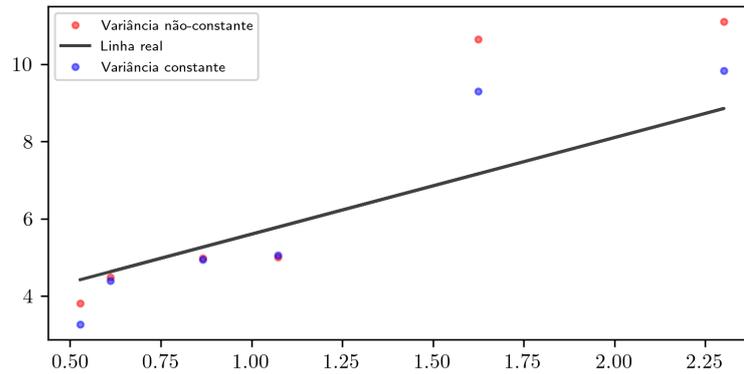


Figura 3 – Amostras com variância constante (azul) e amostras com variância não-constante (vermelho)

as variáveis em análise devem ser homoscedásticas. Entretanto, nem sempre essa suposição é atendida. Na figura 3, é possível observar um conjunto de amostras com variância constante e outro com variância não constante.

Em situações na qual essa premissa não é cumprida, é necessário adotar variâncias proporcionais:

$$\text{Var}(y_i|x_i) = \frac{\sigma^2}{w_i} \quad (22)$$

Onde  $w_i$  são constantes de proporcionalidade, particulares a cada amostra.

De forma a utilizar deste recurso, é proposto o método de linearização por mínimos quadrados ponderados (CHATTERJEE; HADI, 2012) (TACONELI, 2016). Neste caso, a equação em estudo se apresenta de forma bastante semelhante ao método de mínimos quadrados ordinários, como pode ser observado na equação abaixo:

$$y_i = \alpha + x_i\beta + \epsilon_i^* \quad (23)$$

Da mesma forma,  $y_i$  representa o vetor de dados a serem estimados,  $x_i$  representa o vetor de amostras,  $\beta$  representa os coeficientes dependentes e  $\alpha$  os independentes. A diferença está no  $\epsilon^*$ , que agora não mais representa erros com covariâncias constantes e sim, ao isolar  $w_i$  na equação 22, uma matriz de pesos denominada  $\mathbf{W}$  da forma:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & w_n \end{pmatrix}$$

Onde cada  $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ .

Assim, os valores de  $\beta$  e  $\alpha$  podem ser estimados a partir da soma dos quadrados dos erros  $\epsilon_i^*$ , da forma:

$$\beta = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^{*2} \quad (24)$$

Matricialmente, a equação 23 pode ser exposta como se segue:

$$Y = \alpha + X\beta + \epsilon^* \quad (25)$$

De forma um pouco mais detalhada, a equação 24 pode ser expandida da forma:

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (26)$$

Derivando como no método de mínimos quadrados ordinários,  $\alpha$  e  $\beta$  são equacionados:

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x} \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (28)$$

Onde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias ponderadas de  $x$  e  $y$ :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{w_i}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{w_i}$$

Matricialmente, representando  $\mathbf{X} = (x_i - \bar{x})$  e  $\mathbf{Y} = (y_i - \bar{y})$ , a equação 28 é representada por:

$$\beta = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y}$$

De forma gráfica, podemos comparar as duas formas de linearização por mínimos quadrados, para amostras com variância não-constante, através do exemplo exposto na figura 4:

Como é facilmente perceptível, a linha regressora azul, referente ao resultado da linearização pelo método dos mínimos quadrados ponderados traz um erro associado

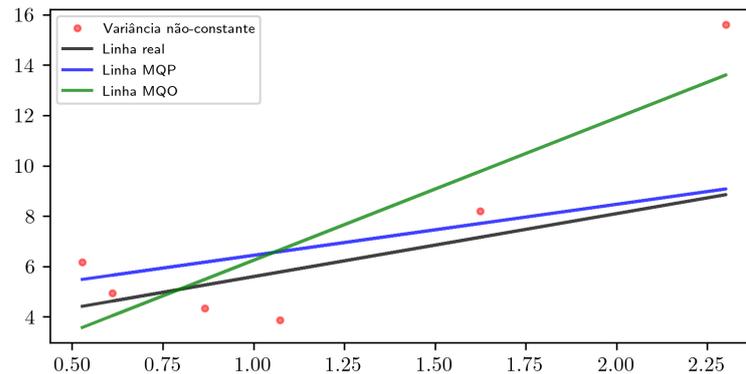


Figura 4 – Linhas regressoras para o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) e para o método dos Mínimos Quadrados Ponderados(MQP)

significativamente menor que o observado na linha oriunda dos mínimos quadrados ordinários.

Uma das medidas de qualidade mais importantes para este tipo de regressão é o coeficiente de determinação  $R^2$ , que possui formulação bastante semelhante ao método de mínimos quadrados, segundo a análise de Willett e Singer (WILLETT; SINGER, 1988), diferindo apenas na soma total dos quadrados como equacionado abaixo:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i(\beta x_i + \alpha)^2}{\sum_{i=1}^n w_i y_i^2 - \frac{1}{\sum_{k=1}^n w_k} \cdot \left( \sum_{i=1}^n w_i y_i \right)^2} \quad (29)$$

Neste ponto, duas observações se fazem necessárias:

- Uma vez que cada peso é inversamente proporcional à variância do erro, uma amostra com pequeno erro na variância terá um peso grande nas estimações;
- Os pesos deverão ser estimados (ou escolhidos arbitrariamente) considerando uma constante de proporcionalidade.

Para a utilização deste método em ordens superiores, deverão ser adotados os mesmos procedimentos expostos no final da seção anterior, a partir da equação 11. A única diferença em relação ao equacionamento descrito no método anterior é que agora, pelo método demandar que para cada dado de entrada possua um peso  $w_i$  associado, as equação 30 deverá contar com este vetor de pesos, da forma:

$$S(a_0, \dots, a^k) = \sum_{i=1}^n w_i [y - (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_k x_i^k)] \quad (30)$$

Após a minimização por derivadas parciais e a reorganização de forma matricial, a equação que encontra o vetor de quocientes  $\mathbf{a}$  é dada por:

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{y} \quad (31)$$

O vetor  $\mathbf{W}$  representa o vetor de pesos associado a cada amostra.

### 2.3 LINEARIZAÇÃO POR DESVIOS MÍNIMOS ABSOLUTOS - *LEAST ABSOLUTE DEVIATIONS*

Um dos principais pontos negativos de qualquer regressão linear por mínimos quadrados ocorre pois ao elevar ao quadrado o erro, é aumentada ao quadrado a importância das amostras com erro maior (FARCOMENI; GRECO, 2015). Isso pode ser particularmente prejudicial ao analisar *outliers*, isto é, amostras discrepantes cujo erro pode não ter a mesma origem dos erros dos outros dados. Nestes casos, este método acabará priorizando estes valores discrepantes e isto aumentará o erro dos outros valores estimados.

Este fato é ilustrado na figura 5:

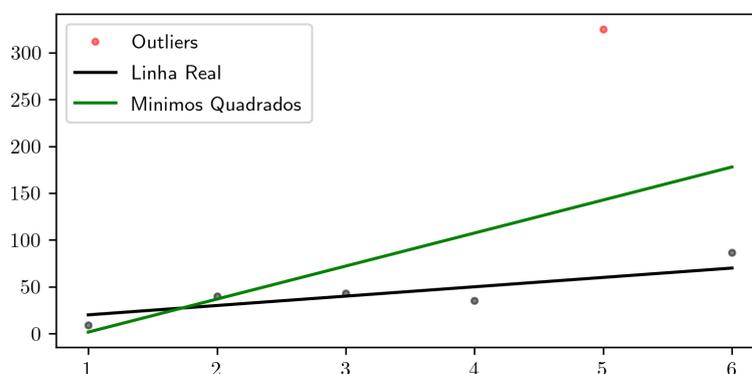


Figura 5 – Influência de um *outlier* na estimação dos valores de  $y$  utilizando mínimos quadrados

O *outlier* (ponto em vermelho) faz com que o valor de  $\beta$  aumente significativamente, inclinando a reta estimada por mínimos quadrados e aumentando o erro entre esta e os dados reais (pontos em cinza).

Visando reduzir este problema, a linearização por desvios mínimos absolutos é proposta pois a minimização neste caso é efetuada sobre o valor absoluto de  $\epsilon$ , em vez de  $\epsilon^2$  (BLOOMFIELD; STEIGER, 1983). Essa característica classifica este método de linearização como robusto (FARCOMENI; GRECO, 2015), isto é: mesmo que existam valores discrepantes entre as amostras, o método ainda será capaz de gerar uma solução com razoável eficiência.

Equacionando o  $\beta$  para este método:

$$\beta = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^n |\epsilon_i| \quad (32)$$

Substituindo  $\epsilon$ :

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n |y_i - \alpha - \beta x_i| \quad (33)$$

Para a implementação de um algoritmo que soluciona este método, é necessário ter em mente o fato de que a linha de regressão sempre cruza pelo menos dois pontos (BLOOMFIELD; STEIGER, 1983). Tomando um primeiro ponto  $(x_1, y_1)$ , deve-se buscar a melhor linha que passa através deste ponto. Esta linha deverá cruzar também outro ponto,  $(x_2, y_2)$ .

O próximo passo é procurar a melhor linha com respeito ao somatório de erros absolutos  $\sum_{i=1}^n |\epsilon_i|$  que cruza  $(x_2, y_2)$ . Essa linha cruzará, pelo menos, um outro ponto  $(x_3, y_3)$  e assim sucessivamente. Durante essas iterações, o valor de  $\sum_{i=1}^n |\epsilon_i|$  diminui até que seja encontrada uma iteração com uma linha obtida idêntica a anterior, onde é possível concluir que esta é a melhor linha de regressão para os pontos fornecidos (DODGE, 2008).

Para a construção da melhor linha cruzando  $(x_1, y_1)$ , devemos encontrar o ponto  $(x_k, y_k)$  para qual a linha seja a melhor em termos de  $\sum_{i=1}^n |\epsilon_i|$ . Esta linha deverá ter a seguinte equação:

$$y(x) = y_1 + \frac{y_k - y_1}{x_k - x_1} (x - x_1) \quad (34)$$

Com a inclinação  $\beta$ :

$$\beta = \frac{y_k - y_1}{x_k - x_1} \quad (35)$$

E com o deslocamento  $\alpha$ :

$$\alpha = y_1 - \beta x_1 \quad (36)$$

Para encontrar o ponto mais facilmente, são renomeados os  $(n - 1)$  pontos candidatos  $(x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  de forma a obter:

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \leq \frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} \leq \dots \leq \frac{y_n - y_1}{x_n - x_1}$$

É definido também  $T = \sum_{i=1}^n |x_i - x_1|$  para obter o ponto procurado em termos de  $k$ , como se segue:

$$\begin{cases} |x_2 - x_1| + \dots + |x_{k-1} - x_1| < \frac{T}{2} \\ |x_2 - x_1| + \dots \\ + |x_{k-1} - x_1| + |x_k - x_1| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (37)$$

Essa condição garante que  $\beta$  minimize a equação 38 de maneira análoga à  $\sum_{i=1}^n |\epsilon_i|$  para as linhas de regressão passando por  $(x_1, y_1)$ .

$$\sum_{i=1}^n |(y_i - y_1) - \beta (x_i - x_1)| \quad (38)$$

É possível também verificar que a linha de regressão obtida passa pelo ponto  $(x_k, y_k)$ , bastando apenas trocar o ponto  $(x_k, y_k)$  por  $(x_2, y_2)$  e recomeçar o algoritmo.

Utilizando os mesmos dados expostos na figura 5, a linearização por desvios mínimos absolutos traz o resultado exposto na figura 6:

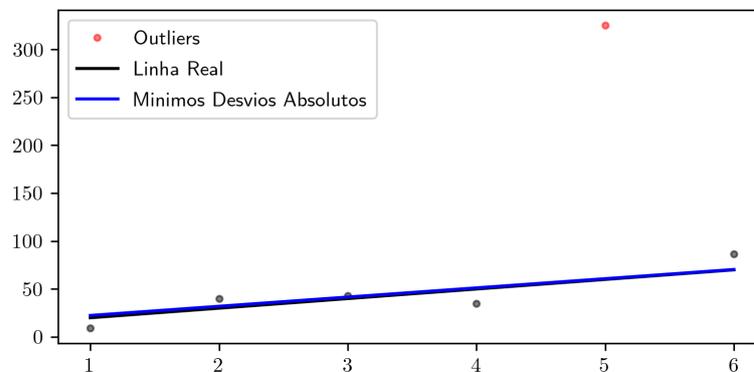


Figura 6 – Linearização utilizando o método de desvios mínimos absolutos

É facilmente observável o efeito dessa linearização: a linha de regressão estimada menospreza o *outlier* em vermelho, mantendo os erros associados às outras amostras menores do que nos métodos de linearização anteriores.

Apesar destas grandes vantagens, este método possui algumas desvantagens consideráveis em relação aos anteriores, a saber:

- Múltiplas soluções são possíveis;
- Uma ou mais soluções instáveis podem ser geradas pelo método. Isto é: a solução obtida poderá, para um pequeno ajuste no eixo  $y$ , modificar a linha de regressão enormemente (ELLIS, 1998);

- Por ser um método essencialmente iterativo desde a estimação dos valores iniciais, uma maior quantidade de recursos computacionais se faz necessária.

Para a utilização deste método em ordens superiores, o equacionamento segue a mesma lógica exposta no final da seção que aborda Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, a partir da equação 10. Entretanto, neste método, a equação 11 não deverá mais ser elevada ao quadrado, tornando-se apenas:

$$S(a_0, \dots, a^k) = \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1x_i + \dots + a_kx_i^k)] \quad (39)$$

Apesar da equação que resolve o modelo ser idêntica à equação 21, deve ser mencionado que não é possível resolver esta de forma analítica pois as matrizes que compõem a equação são mal condicionadas. Desta forma, é necessária uma solução iterativa.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 AMBIENTE DE TESTES

Para a implementação das metodologias de testes utilizadas neste trabalho, foi necessário reproduzir em laboratório o ambiente de utilização real de uma *Merging Unit*, isto é: foi necessário reproduzir o ambiente da subestação elétrica digital no qual o equipamento está inserido. O esquema exposto na figura 7 ilustra como é este sistema:

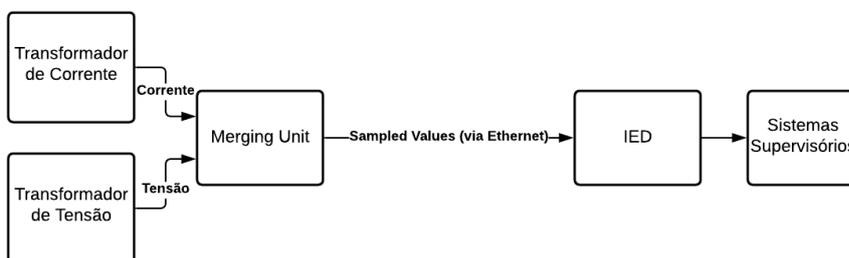


Figura 7 – Exemplo de utilização de uma *Merging Unit* em uma subestação elétrica digital

Neste exemplo, a *Merging Unit* serve como interface entre os transformadores de instrumentação e os IEDs da rede, gerando o fluxo de *Sampled Values* conforme com a norma IEC-61850 (IEC, 2020a) a partir dos sinais de corrente e tensão aplicados. IED, do inglês *Intelligent Electronic Device* ou Dispositivo Eletrônico Inteligente, é qualquer dispositivo que incorpora um ou mais processadores com a capacidade de receber ou enviar/controlar dados de ou para uma fonte externa de sinal (e.g., relés digitais, disjuntores) (MCDONALD, 2007). Já *Sampled Values* (TYPHOON HIL, 2020) é o protocolo padrão utilizado para comunicação ente as *Merging Units* e os IEDs. Este protocolo é do tipo *publisher/subscriber*, onde o *publisher* (neste caso a *Merging Unit*), envia mensagens pela rede *Ethernet* periodicamente com intervalos de tempo precisamente definidos. Estas mensagens contém o valor amostrado de cada um dos sinais aplicados nas placas de aquisição analógica da *Merging Unit*. O intervalo de tempo depende de dois fatores: a frequência do sinal medido e a quantidade de amostras por ciclo de sinal. A norma IEC 61850-9-2LE (IEC, 2020a) define dois valores para a quantidade de amostras por ciclo: 80 para equipamentos de proteção e 256 para equipamentos de medição. Para a frequência do sinal adquirido não há restrições, sendo 50 e 60 Hz os valores mais comumente utilizados. O *subscriber*, representado neste exemplo pelos *IEDs*, “subscreve” aos pacotes de *Sampled Values* buscando receber informações sobre um determinado dispositivo da rede.

Para reproduzir esse mesmo ambiente em laboratório, são substituídos os transformadores por uma fonte de tensão e corrente e o IED por um computador, que

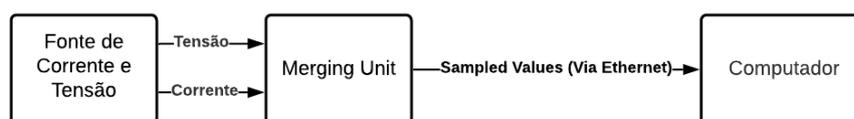


Figura 8 – Ambiente em laboratório para aquisição de dados com *Merging Unit*

receberá e processará os *Sampled Values*. A figura 8 ilustra esse ambiente.

Após a aquisição dos *Sampled Values* pelo computador via interface de rede *Ethernet*, se faz necessária a conversão deste fluxo de dados em um formato padrão para oscilografias em sistemas elétricos. Para tanto, é escolhido o formato COMTRADE (IEEE, 1992) (IEEE, 2020), que é o acrônimo para *Common Format for Transient Data Exchange*, ou Formato Comum para Troca de Dados Transientes. Este formato é composto, no mínimo, por dois arquivos: um arquivo de configuração com extensão .cfg, que descreve os canais de aquisição contidos no COMTRADE e suas características, como frequência nominal do canal, quantidade de canais amostrados, unidade de medição, etc. O quadro 1 ilustra um exemplo de arquivo de configuração de COMTRADE.

Quadro 1 – Exemplo do arquivo de configuração do COMTRADE.

```

Test,518,1999 <CR/LF>
12,6A,6D <CR/LF>
1,P Va-g,,kV, 0.14462,0.0000000000,0,-2048,2047,2000,1,P <CR/LF>
2,P Vc-g,,kV, 0.14462,0.0000000000,0,-2048,2047,2000,1,P <CR/LF>
3,P Vb-g,,KV, 0.14462,0.0000000000,0,-2048,2047,2000,1,P <CR/LF>
4,P Ia,,A,11.5093049423,0.0000000000,0,-2048,2047,1200,5,P <CR/LF>
5,P Ib,,A,11.5093049423,0.0000000000,0,-2048,2047,1200,5,P <CR/LF>
6,P Ic,,A,11.5093049423,0.0000000000,0,-2048,2047,1200,5,P <CR/LF>
1,Va over,,,0 <CR/LF>
2,Vb over,,,0 <CR/LF>
3,Vc over,,,0 <CR/LF>
4,Ia over,,,0 <CR/LF>
5,Ib over,,,0 <CR/LF>
6,Ic over,,,0 <CR/LF>
60 <CR/LF>
1 <CR/LF>
6000.000,885 <CR/LF>
20/07/2005,17:38:26.663700 <CR/LF>
20/07/2005,17:38:26.687500 <CR/LF>
ASCII <CR/LF>
1

```

O outro arquivo imprescindível para o COMTRADE é o que contém as próprias amostras, com extensão .dat. Este arquivo pode estar codificado em ASCII com representação decimal separada por vírgulas ou em binário. Os arquivos em ASCII

e em binário possuem estrutura idêntica por linha, contendo o número da amostra, o intervalo de tempo em relação ao início do registro em  $\mu s$ , as medidas analógicas e também as digitais. No modo binário, as informações numéricas estão em formato *little-endian* de 16 bits, enquanto no formato ASCII estas são separadas por vírgula e por uma quebra de linha ao final de cada amostra. O quadro 2 exemplifica essa estrutura.

Quadro 2 – Exemplo de uma linha do arquivo de dados do COMTRADE.

```
5, 667, -760, 1274, 72, 61, -140, -502,0,0,0,0,1,1 <CR/LF>
```

Este ambiente de testes de calibração é inspirado do processo que acontece na própria fábrica da *Merging Unit*, durante a etapa de industrialização. Na fábrica, as *Merging Units* são montadas, testadas e, antes de serem enviados aos clientes, passam por uma primeira etapa de calibração dos canais de aquisição analógica utilizando uma fonte de referência com suficiente precisão em relação aos erros máximos permitidos pelo fabricante. Após a obtenção dos coeficientes de calibração para cada um dos canais, o equipamento passa por um processo de *Burn-In*: o mesmo é acomodado em um forno com temperatura ajustável durante 12 horas, de forma a acelerar o processo de *aging* dos componentes. Após esta etapa, a *Merging Unit* é calibrada uma vez mais, onde então os coeficientes desta segunda calibração sobrescrevem os coeficientes da primeira no equipamento. Neste momento, a *Merging Unit* está pronta para ser enviada para o cliente.

### 3.2 GERAÇÃO DE SINAIS E AQUISIÇÃO PELA MERGING UNIT

Na configuração de testes proposta, será utilizada uma fonte de sinais de tensão e corrente programável com precisão maior que as placas de aquisição analógica da *Merging Unit* em análise, de forma a reduzir os erros inerentes ao sinal aplicado. A partir destes sinais, a *Merging Unit* deverá capturar e processar em tempo real gerando como saída um fluxo de *Sampled Values*. Estes fluxo de dados deverá ser direcionado a um computador para processamento posterior via interface de rede *ethernet*.

### 3.3 RECEBIMENTO DOS PACOTES DE SAMPLED VALUES E RECONSTRUÇÃO DOS SINAIS APLICADOS

Já com estes pacotes de *Sampled Values* recebidos pelo computador, é momento de processar esses dados de forma a poder discernir e reconstruir os sinais para cada um dos canais de aquisição analógica da *Merging Unit*. O primeiro passo deste processamento é a conversão desses pacotes em COMTRADES. Através deste formato, cada uma das amostras presentes nos dados gerados pela *Merging Unit* torna-se um valor numérico de corrente ou tensão, permitindo representar os sinais aplicados

pela fonte de tensão e corrente. Na figura 9, é observada essa reconstrução de um sinal de corrente de 50mA RMS:

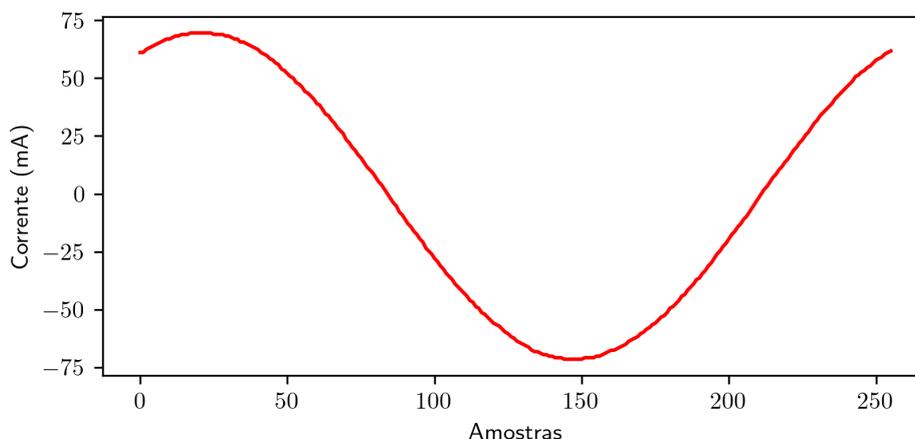


Figura 9 – Exemplo de oscilografia construída a partir de COMTRADE.

### 3.4 CÁLCULO DOS ERROS DE MAGNITUDE DOS SINAIS RECONSTRUÍDOS

Após a reconstrução das amostras para cada um dos canais de aquisição, é calculado o valor quadrático médio ou RMS (do inglês *Root Mean Square*) por ciclo, como exposto na equação 40:

$$RMS(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |u(Nk + i)|^2} \quad (40)$$

Onde N representa o número de amostras por ciclo do sinal avaliado e k é o índice que representa o ciclo atual do sinal. A função  $u(Nk + i)$  representa os sinais amostrados de corrente e tensão em análise.

Estes valores são muito informativos pois restringem o número de amostras utilizadas como entrada para os algoritmos de calibração de cada canal, sem perder informações substanciais dos sinais originais.

Neste ponto, é possível calcular os erros de magnitude entre o valor RMS dos sinais aplicados pela fonte e cada um dos valores RMS obtidos por ciclo. De forma a aumentar a variedade dos resultados e trazer mais informações, para cada sinal aplicado são salvos o maior, o menor e a média entre os erros.

### 3.5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Para obter os valores de entrada para os métodos de calibração descritos no capítulo 2, são analisados os valores RMS para cada ciclo de medição e escolhidos

os valores que possuam maior erro de magnitude em relação ao valor de referência aplicado pela fonte de tensão e corrente. De forma a ampliar os resultados, também serão utilizados como valores de entrada os valores RMS que possuam o menor erro em relação ao valor de referência e também a média entre os valores RMS de cada ciclo de sinal aplicado.

Com estes valores em mãos, faz-se mister a aplicação destes nos algoritmos, obtendo assim os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  de linearização para cada um dos métodos. Estes coeficientes são então aplicados nos valores de entrada, com o intuito de verificar o impacto da calibração dos canais de aquisição sobre os sinais de tensão e corrente amostrados.

A fim de encontrar o melhor entre os algoritmos propostos, são analisados os novos erros de magnitude entre os sinais aplicados pela fonte e os sinais calibrados, bem como figuras de mérito inerentes a este tipo de linearização, como o coeficiente de determinação  $R^2$ .

Com o resultado desta análise, é então possível avaliar qual das metodologias de calibração para os canais de aquisição analógica da *Merging Unit* trouxe melhores resultados, isto é: qual reduziu mais os seus erros em relação ao sinal aplicado.

De forma a sumarizar os processos descritos nesta seção, a figura 10 ilustra cada um dos passos acima descritos.

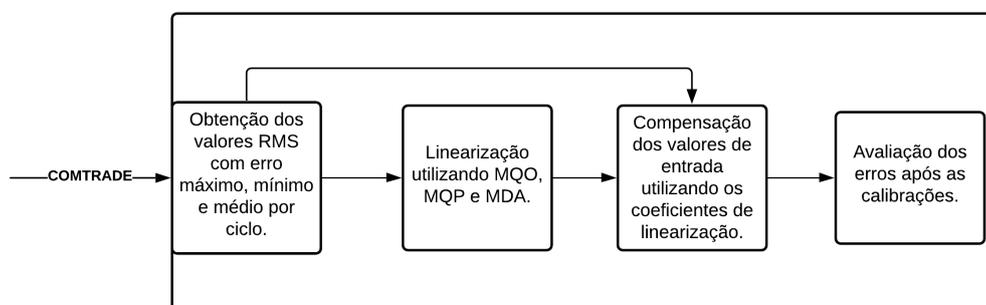


Figura 10 – Diagrama dos procedimentos descritos na seção de aplicação dos métodos de calibração e avaliação dos resultados.

## 4 RESULTADOS

Utilizando a metodologia descrita no [Capítulo 3](#), foram executadas uma série de ensaios de aquisição, transmissão e processamento de dados utilizando uma *Merging Unit* comercial com o intuito de validar os métodos propostos no [Capítulo 2](#).

### 4.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O equipamento utilizado como fonte de tensão e corrente foi a fonte de referência *Fluke 6100A* (FLUKE, 2021). Este dispositivo é amplamente utilizado para a calibração de equipamentos de medição presentes em sistemas de energia elétrica, sendo assim a fonte ideal para estes ensaios.

A *Merging Unit* utilizada nos ensaios possui três tipos de placas de aquisição analógica: duas de proteção, com 1A e 5A de correntes de entrada nominais, e uma de medição, com 1A de corrente nominal. Nos ensaios descritos neste capítulo, foi utilizada uma placa de aquisição deste terceiro modelo, por conta de ser a placa que possui especificações de precisão mais rígidas. Todos os três modelos possuem 115V de tensão nominal, 50/60Hz de frequência nominal e oito canais de aquisição, sendo quatro de corrente e quatro de tensão. Na tabela 1 estão descritas as especificações de precisão de corrente desta placa e na tabela 2 as especificações de tensão.

Tabela 1 – Especificações de Corrente de entrada para a placa de aquisição utilizada.

Faixa de amplitude (A)	Erro	Erro de Fase
0.05In ... 0.2In	< 0.6 % rd	< ± 0.3°
0.2In ... 0.8In	< ± 0.2 % rd	< ± 0.15°
0.8In ... 4In	< ± 0.1 % rd	< ± 0.1°
4In ... 40In	< ± 0.4 % rd	< ± 0.2°

Fonte: Produzido pelo autor.

Nota: rd representa o valor lido (em A).

Tabela 2 – Especificações de Tensão de entrada para a placa de aquisição utilizada.

Faixa de amplitude (V)	Erro	Erro de Fase
0.08Vn ... 2Vn	< 0.1% rd	< ± 0.1°

Fonte: Produzido pelo autor.

Nota: rd representa o valor lido (em V).

Por serem de medição, os sinais aplicados nas entradas desta placa são amostrados 256 vezes por ciclo, trazendo 15360 amostras por segundo.

A *Merging Unit* escolhida para estes experimentos possui apenas dois parâmetros de calibração: ganho e *offset*. Isso vale dizer que, na prática, é possível apenas calibrar estas placas de aquisição com linearizações de primeira ordem.

## 4.2 SINAIS APLICADOS

Com o intuito de cobrir o máximo das faixas de aquisição do equipamento, os ensaios foram efetuados aplicando os seguintes sinais, cada qual com a duração de 2s:

- 9.2V e 0.05A (8% da tensão nominal e 5% da corrente nominal);
- 57V e 0.2A (49% da tensão nominal e 20% da corrente nominal);
- 92V e 1A (80% da tensão nominal e 100% da corrente nominal);
- 115V e 1.2A (100% da tensão nominal e 120% da corrente nominal);
- 138V e 3A (120% da tensão nominal e 300% da corrente nominal);
- 161V e 4A (140% da tensão nominal e 400% da corrente nominal).

Estes ensaios foram executados para as frequências de 50Hz e 60Hz. Apesar das especificações da *Merging Unit* utilizada não trazer informações sobre os erros relacionados à frequência do sinal amostrado, esta variedade de frequências foi utilizada pois na norma que define os requisitos para as *Merging Units* (IEC, 2021), há uma série de especificações e restrições em termos de frequência do sinal aplicado.

## 4.3 ERROS ANTES DAS CALIBRAÇÕES

A fim de expor os erros antes das calibrações de maneira objetiva, mas que contenham a quantidade de detalhes necessária para a análise antes e após a aplicação dos métodos de calibração, foram escolhidos um canal de tensão e um de corrente. De forma arbitrária, foram escolhidos o canal VC de tensão e o canal IA de corrente para uma análise mais aprofundada. Esta escolha foi tomada pois todos os canais são iguais por projeto, o que tira a necessidade de uma análise particular para cada um dos quatro canais de corrente ou para cada um dos quatro canais de tensão da placa.

As tabelas 3 e 4 mostram os erros máximos, mínimos e médios entre os valores aplicados pela fonte de referência em 60Hz nos canais de corrente IA e de tensão VC e o sinal obtido a partir do fluxo de dados (registro no formato COMTRADE) gerado pela *Merging Unit* antes de qualquer calibração.

Tabela 3 – Sinais de corrente em 60Hz aplicados do canal de corrente IA e os erros observados no COMTRADE gerado.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	49.6972	-0.6054	50.0724	0.1449	49.9492	-0.1015
200	0.2 %	198.4886	-0.7557	198.8362	-0.5819	198.6554	-0.6723
1000	0.1 %	992.5441	-0.7456	996.3666	-0.3633	994.4909	-0.5509
1200	0.1 %	1191.3389	-0.7218	1195.8324	-0.3473	1193.9886	-0.501
3000	0.1 %	2977.7406	-0.7427	2986.4467	-0.4518	2980.7856	-0.6405
4000	0.1 %	3970.6934	-0.7327	3984.9192	-0.377	3976.2538	-0.5937

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4 – Sinais de tensão em 60Hz aplicados do canal de tensão VC e os erros observados no COMTRADE gerado.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.0365	-1.7776	9.1038	-1.046	9.0721	-1.3905
57	0.1 %	56.5918	-0.7161	56.6886	-0.5464	56.6271	-0.6542
92	0.1 %	90.5461	-1.5804	90.8937	-1.2025	90.7219	-1.3892
115	0.1 %	113.212	-1.5548	113.6297	-1.1915	113.462	-1.3374
138	0.1 %	135.8283	-1.5737	136.2215	-1.2887	135.9616	-1.4771
161	0.1 %	158.4674	-1.573	159.0317	-1.2225	158.6857	-1.4374

Fonte: Produzido pelo autor.

Deste momento em diante, muitas tabelas como estas serão expostas, fazendo-se necessária uma explicação mais detalhada desta forma de apresentação dos dados. Assim, da esquerda para a direita: na primeira coluna, têm-se as amplitudes dos sinais em RMS aplicados pela fonte de referência. Na segunda, têm-se as porcentagens de erro máximas permitidas pelo fabricante para os sinais aplicados. Na terceira coluna, têm-se os valores que, dentre os ciclos RMS capturados, trouxeram maior erro em relação aos sinais de referência e na quarta coluna temos o quanto de erro percentual estes valores representam. Na quinta e na sexta coluna, por suas vezes, têm-se os valores que, dentre os ciclos RMS capturados, trouxeram menor erro em relação aos sinais de referência e o quanto de erro percentual estes valores representam. Por fim, na sétima e oitava colunas temos os os valores médios entre todos os ciclos RMS calculados e o quanto de erro percentual em relação à referência estes valores representam. As tabelas com este mesmo modelo que aparecem nas seções seguintes possuem explicação semelhante, com a diferença de que, nestas, as colunas 3, 4, 5, 6,

7 e 8 apresentam os valores obtidos após as aplicações dos coeficientes de calibração, utilizando o método abordado na seção.

As tabelas 5 e 6 mostram os erros máximos, mínimos e médios entre os valores aplicados pela fonte de referência agora em 50Hz nos mesmos canais IA e VC, antes das calibrações.

Tabela 5 – Sinais de corrente em 50Hz aplicados do canal de corrente IA e os erros observados no COMTRADE gerado.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	45.6652	-8.6697	53.3063	6.6126	46.606	-6.7879
200	0.2 %	181.3421	-9.329	183.8014	-8.0993	183.6756	-8.1622
1000	0.1 %	906.9636	-9.3036	918.6465	-8.1353	915.047	-8.4953
1200	0.1 %	1088.7455	-9.2712	1100.1593	-8.3201	1095.6554	-8.6954
3000	0.1 %	2721.4705	-9.2843	2756.0831	-8.1306	2740.8389	-8.6387
4000	0.1 %	3629.1494	-9.2713	3678.0604	-8.0485	3654.2462	-8.6438

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 6 – Sinais de tensão em 50Hz aplicados do canal de tensão VC e os erros observados no COMTRADE gerado.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	8.3388	-9.3606	9.6312	4.6871	8.6025	-6.4942
57	0.1 %	51.7131	-9.2752	52.3354	-8.1835	52.0942	-8.6067
92	0.1 %	82.7521	-10.0521	96.2173	4.584	86.2113	-6.2921
115	0.1 %	103.4385	-10.0535	120.567	4.8409	107.5381	-6.4886
138	0.1 %	124.1371	-10.0456	125.0368	-9.3936	124.7234	-9.6207
161	0.1 %	144.8313	-10.0427	145.974	-9.3329	145.0223	-9.924

Fonte: Produzido pelo autor.

Como é possível perceber comparando com os erros máximos do equipamento expostos nas tabelas 1 e 2 com os erros obtidos nas tabelas 3, 4, 5 e 6 a placa de aquisição analisada não atende as especificações de corrente e tensão sem calibração. É interessante observar que os sinais medidos aparecem quase sempre com magnitude menor aos sinais aplicados pela fonte de referência.

#### 4.4 MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS

As leituras corrigidas pelos coeficientes de primeira ordem (ganho e *offset*) obtidos através do método de mínimos quadrados ordinários para sinais com 60Hz estão expostas nas tabelas 7 para o canal corrente IA e 8 para o canal de tensão VC. A figura 11 ilustra a reta ajustada após a aplicação deste método.

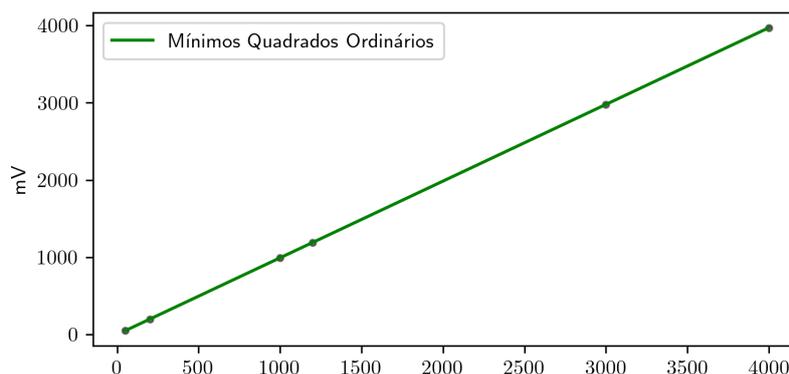


Figura 11 – Reta ajustada utilizando o método de Mínimos Quadrados Ordinários utilizando como sinais de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao sinal aplicado para o canal IA

Tabela 7 – Sinais de corrente em 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	50.0732	0.1464	49.9873	-0.0254	50.6492	1.2984
200	0.2 %	199.9676	-0.0162	199.3803	-0.3098	200.2772	0.1386
1000	0.1 %	999.9097	-0.009	996.6468	-0.3353	1001.046	0.1046
1200	0.1 %	1200.1783	0.0149	1196.2456	-0.3129	1201.7803	0.1484
3000	0.1 %	2999.8235	-0.0059	2989.8713	-0.3376	2999.6535	-0.0116
4000	0.1 %	4000.1375	0.0034	3986.8394	-0.3290	4001.2924	0.0323

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 8 – Sinais de tensão em 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.3749	1.9014	9.4092	2.274	9.3173	1.8123
57	0.1 %	57.7436	1.3046	57.6445	1.1307	57.7222	1.267
92	0.1 %	92.2785	0.3028	92.3173	0.3449	92.3547	0.3855
115	0.1 %	115.3321	0.2888	115.3641	0.3166	115.4533	0.3942
138	0.1 %	138.3352	0.2429	138.2648	0.1919	138.3077	0.2230
161	0.1 %	161.3615	0.2245	161.3868	0.2402	161.3902	0.2423

Fonte: Produzido pelo autor.

Como é possível observar na tabela 7, houve significativa melhora nos erros relativos aos sinais de corrente. Após a calibração utilizando os pontos de erro máximo, os valores lidos em toda a faixa de aquisição passaram a se encontrar dentro da tolerância do equipamento. Entretanto, é perceptível que a calibração utilizando os pontos de erro mínimo e erro médio acabou por gerar coeficientes que, na maioria dos pontos, não reduziram tanto os erros quanto a calibração feita utilizando os pontos de erro máximo. Apesar disto, mesmo nestes casos as leituras ficaram dentro das especificações.

Já para os dados de tensão expostos na tabela 8, apesar da diminuição nos erros em toda a faixa de aquisição, estes ainda não se encontram dentro do especificado pelo fabricante (0.1 % de 0.08Vn até 2Vn) em nenhum dos conjuntos de dados usados para calibração.

Com sinais aplicados com 50Hz, obtém-se os valores expostos nas tabelas 9 e 10 após a correção utilizando os coeficientes de primeira ordem utilizando o método de mínimos quadrados ordinários.

Tabela 9 – Sinais de corrente em 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	50.3303	0.6606	50.4465	0.893	49.6527	-0.6947
200	0.2 %	199.8804	-0.0598	200.5212	0.2606	199.4184	-0.2908
1000	0.1 %	999.6978	-0.0302	1001.8729	0.1873	1000.1444	0.0144
1200	0.1 %	1200.0672	0.0056	1199.4922	-0.0423	1197.7319	-0.189
3000	0.1 %	2999.7407	-0.0086	3002.3547	0.0785	2994.7691	-0.1744
4000	0.1 %	4000.231	0.0058	4006.1437	0.1536	4002.1524	0.0538

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 10 – Sinais de tensão em 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ordinários.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.5037	3.3011	10.2354	11.2543	9.3615	1.7554
57	0.1 %	57.7989	1.4015	61.4752	7.8512	57.6901	1.2107
92	0.1 %	92.3592	0.3904	109.4042	18.9176	92.3574	0.3885
115	0.1 %	115.3925	0.3413	135.9996	18.2605	115.1646	0.1431
138	0.1 %	138.4393	0.3184	140.8817	2.0882	138.1461	0.1059
161	0.1 %	161.4813	0.299	163.7498	1.7079	161.4896	0.3041

Fonte: Produzido pelo autor.

Analisando os resultados para sinais de corrente, é perceptível que o único ponto a estar fora das especificações do fabricante (0.6 %) possui 50 mA de amplitude, tanto utilizando como valores de entrada os valores RMS dos ciclos com maior erro em relação ao valor aplicado, quanto utilizando os valores RMS com erro mínimo por ciclo ou o valor médio entre os valores RMS obtidos em todos os ciclos de aquisição. Para sinais de corrente com amplitude maior, a calibração mostrou-se suficiente. Nos resultados para sinais de tensão, observa-se um erro máximo superando os 0.1 % máximos segundo o fabricante para toda a extensão de valores aplicados, tanto utilizando como valores de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao valor aplicado quanto os valores com menor, bem como o erro entre o valor RMS médio entre todos os ciclos de sinal capturados.

A tabela 11 expõe os valores de  $R^2$  para cada um dos conjuntos de dados usados para a linearização. É observável que, uma vez que a linearização traz resultados muito próximos dos nominais, este valor é muito próximo de 1. Entretanto, como critério de

avaliação, o coeficiente  $R^2$  traz poucas informações, pois para todos os valores de entrada este coeficiente torna-se muito próximo de 1.

Tabela 11 – Coeficientes  $R^2$  para a linearização por Mínimos Quadrados Ordinários.

Canal IA		
$R^2$ Erro máximo	$R^2$ Erro Mínimo	$R^2$ Erro médio
999999992454582	0.999999681815048	0.99999977198064
Canal VC		
$R^2$ Erro máximo	$R^2$ Erro Mínimo	$R^2$ Erro médio
0.999987761633336	0.999992528523623	0.999990248990353

Fonte: Produzido pelo autor.

#### 4.5 MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

Já utilizando o método dos mínimos quadrados ponderados, os resultados da calibração estão expostos nas tabelas 12 para corrente e 13 para tensão. É digno de menção que o vetor de a matriz diagonal de pesos utilizada é inversamente proporcional aos erros máximos especificados pelo fabricante nas tabelas 1 e 2, isto é: os sinais aplicados em regiões de aquisição com erro menor permitido terão peso maior na linearização. A figura 12 ilustra a reta ajustada após a aplicação deste método.

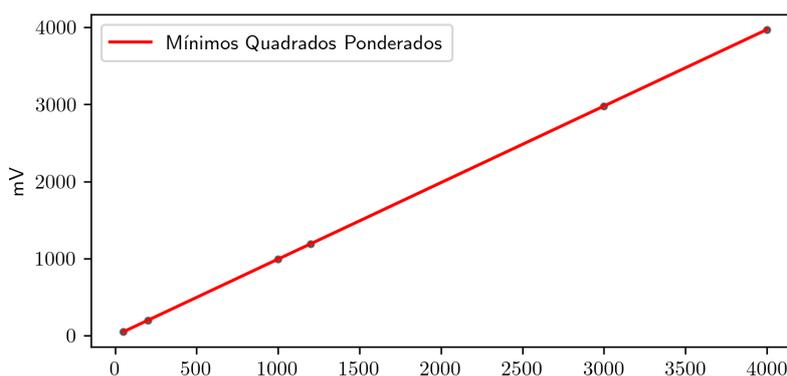


Figura 12 – Reta ajustada utilizando o método de Mínimos Quadrados Ponderados utilizando como sinais de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao sinal aplicado para o canal IA

Tabela 12 – [Sinais de corrente com frequência de 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	50.0988	0.1976	50.7535	1.507	51.0945	2.1889
200	0.2 %	199.9982	-0.0009	200.1686	0.0843	200.7633	0.3816
1000	0.1 %	999.9671	-0.0033	1001.1913	0.1191	1001.7502	0.175
1200	0.1 %	1200.2424	0.0202	1201.5306	0.1275	1202.5392	0.2116
3000	0.1 %	2999.9478	-0.0017	2999.9857	-0.0005	3000.9022	0.0301
4000	0.1 %	4000.2953	0.0074	4002.8304	0.0708	4002.814	0.0704

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 13 – Sinais de tensão com frequência de 60Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.3749	1.9014	9.4092	2.274	9.4173	2.3623
57	0.1 %	57.7436	1.3046	57.6445	1.1307	57.7222	1.267
92	0.1 %	92.2785	0.3028	92.3173	0.3449	92.3547	0.3855
115	0.1 %	115.3321	0.2888	115.3641	0.3166	115.4533	0.3942
138	0.1 %	138.3352	0.2429	138.2648	0.1919	138.3077	0.223
161	0.1 %	161.3615	0.2245	161.3868	0.2402	161.3902	0.2423

Fonte: Produzido pelo autor.

Da mesma forma que no método anterior, é possível verificar que a calibração do canal de tensão mostrou-se insuficiente para trazer a leitura dos sinais de tensão para dentro das especificações do equipamento, tendo como piores casos os sinais com amplitude menor. Para o canal de corrente, são observados resultados semelhantes utilizando os pontos com erro máximo como entrada do algoritmo. Entretanto, utilizando os pontos de erro mínimo e de erro médio, a linearização acabou piorando o erro nos pontos com menor amplitude de corrente, sendo suficiente para não atender as especificações.

Utilizando os sinais de 50Hz como entrada do método, obtém-se as tabelas 14 e 15 após aplicação dos coeficientes gerados para correção.

Com este método, foram obtidos resultados dentro dos máximos permitidos pelo fabricante para toda a faixa de aquisição de corrente utilizando como valores de entrada os valores RMS com erro máximo entre os ciclos e erro médio entre todos os ciclos

RMS. Utilizando o erro mínimo por ciclo como entrada para o método, o sinal de 50mA permanece fora das especificações do fabricante.

Para as aquisições de tensão, em nenhum dos grupos de sinais de entrada foi possível atingir os mínimos descritos na documentação do equipamento (0.1 %).

Tabela 14 – Sinais de corrente com frequência de 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	50.2551	0.5102	57.6585	15.3169	50.2479	0.4957
200	0.2 %	199.8071	-0.0965	199.6745	-0.1627	200.0427	0.0213
1000	0.1 %	999.6346	-0.0365	999.3963	-0.0604	1001.5594	0.1559
1200	0.1 %	1200.0065	0.0005	1196.9341	-0.2555	1199.3174	-0.0569
3000	0.1 %	2999.7027	-0.0099	2999.0531	-0.0316	2997.9047	-0.0698
4000	0.1 %	4000.2057	0.0051	4002.4282	0.0607	4006.1568	0.1539

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 15 – Sinais de tensão com frequência de 50Hz corrigidos após calibração utilizando Mínimos Quadrados Ponderados.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.3749	1.9014	9.4092	2.274	9.4173	2.3623
57	0.1 %	57.7436	1.3046	57.6445	1.1307	57.7222	1.267
92	0.1 %	92.2785	0.3028	92.3173	0.3449	92.3547	0.3855
115	0.1 %	115.3321	0.2888	115.3641	0.3166	115.4533	0.3942
138	0.1 %	138.3352	0.2429	138.2648	0.1919	138.3077	0.223
161	0.1 %	161.3615	0.2245	161.3868	0.2402	161.3902	0.2423

Fonte: Produzido pelo autor.

Da mesma forma que no método de mínimos quadrados ordinários, os coeficientes de determinação  $R^2$  não trazem informações muito úteis na análise, exceto por descrever a boa linearização obtida pelo algoritmo. A tabela 16 expõe estes valores.

Tabela 16 – Coeficientes  $R^2$  para a linearização por Mínimos Quadrados Ponderados.

Canal IA		
$R^2$ Erro máximo	$R^2$ Erro Mínimo	$R^2$ Erro médio
0.999999900283003	0.99999952000389	0.99999960002109
Canal VC		
$R^2$ Erro máximo	$R^2$ Erro Mínimo	$R^2$ Erro médio
0.9999835900083	0.99999036982379	0.999987420008623

Fonte: Produzido pelo autor.

#### 4.6 MÍNIMOS DESVIOS ABSOLUTOS

Corrigindo os valores expostos nas tabelas 1 e 2 com os coeficientes de primeira ordem resultantes da aplicação do método de mínimos desvios absolutos, são obtidos os resultados expostos nas tabelas 17 e 18. A figura 13 ilustra a reta ajustada após a aplicação deste método.

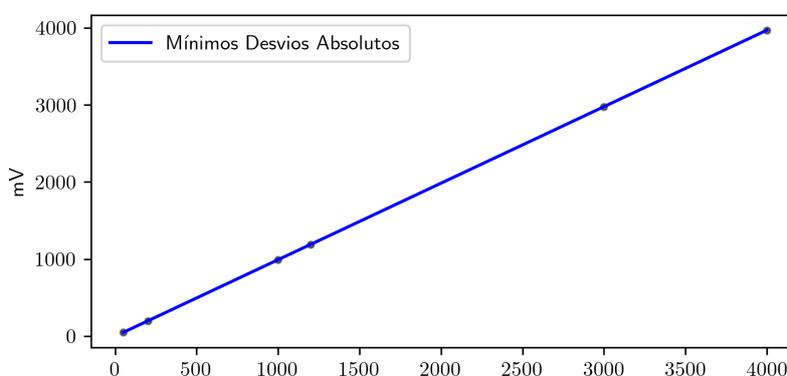


Figura 13 – Reta ajustada utilizando o método de Mínimos Desvios Absolutos utilizando como sinais de entrada os valores RMS com maior erro em relação ao sinal aplicado para o canal IA

Tabela 17 – Sinais de corrente corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	50.015	0.0299	50.4466	0.8932	50.8247	1.6494
200	0.2 %	199.9026	-0.0487	199.7801	-0.1099	200.4405	0.2202
1000	0.1 %	999.809	-0.0191	1000.3653	0.0365	1001.1435	0.1143
1200	0.1 %	1200.0687	0.0057	1200.5952	0.0496	1201.8613	0.1551
3000	0.1 %	2999.6333	-0.0122	2998.0683	-0.0644	2999.5868	-0.0138
4000	0.1 %	3999.9026	-0.0024	4000.3653	0.0091	4001.1435	0.0286

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 18 – Sinais de tensão corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.3201	1.3055	9.939	8.0331	10.0301	9.0226
57	0.1 %	57.6822	1.1969	58.3836	2.4274	58.5599	2.7367
92	0.1 %	92.2125	0.2309	93.2068	1.3118	93.3537	1.4714
115	0.1 %	115.2629	0.2286	116.3537	1.1771	116.5599	1.3564
138	0.1 %	138.2629	0.1905	139.3537	0.9809	139.5208	1.102
161	0.1 %	161.2861	0.1777	162.576	0.9789	162.7107	1.0625

Fonte: Produzido pelo autor.

Utilizando o método dos Mínimos Desvios Absolutos com sinais com frequência de 60 Hz, a linearização a partir dos pontos de maior erro em relação à amplitude dos sinais de corrente aplicados trouxe resultados melhores que nos dois métodos anteriores para os pontos máximo e mínimo. Para valores mais próximos do nominal, este método teve resultados semelhantes aos dois métodos anteriores. Da mesma forma que os dois métodos anteriores, a calibração utilizando os pontos de erro mínimo e erro médio trouxeram resultados insuficientes para fazer com que o erro fique dentro das suas próprias especificações.

Com sinais de entrada com frequência de 50 Hz, os resultados estão expostos nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19 – Sinais de corrente corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos.

Canal IA							
Val. Apl. (mA)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
50	0.6 %	50.2083	0.4167	57.7874	15.5748	49.8114	-0.3772
200	0.2 %	199.7446	-0.1277	199.8041	-0.098	199.3656	-0.3172
1000	0.1 %	999.4883	-0.0512	999.5293	-0.0471	999.5949	-0.0405
1200	0.1 %	1199.8391	-0.0134	1197.068	-0.2443	1197.0352	-0.2471
3000	0.1 %	2999.3466	-0.0218	2999.1949	-0.0268	2992.7333	-0.2422
4000	0.1 %	3999.7447	-0.0064	4002.5744	0.0644	3999.3659	-0.0159

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 20 – Sinais de tensão corrigidos após calibração utilizando Mínimos Desvios Absolutos.

Canal VC							
Val. Apl. (V)	Err. Máx.	Valor Máx.	%	Valor Mín.	%	Valor Méd.	%
9.2	0.1 %	9.2509	0.5532	11.7113	27.2963	9.8202	6.7416
57	0.1 %	57.4621	0.8107	59.1408	3.7559	58.3718	2.4067
92	0.1 %	91.9623	-0.0409	107.8784	17.2592	93.1991	1.3034
115	0.1 %	114.9556	-0.0386	134.9226	17.324	116.1116	0.9666
138	0.1 %	137.9624	-0.0273	139.887	1.3674	139.1992	0.869
161	0.1 %	160.9643	-0.0222	163.1409	1.3297	162.6504	1.0251

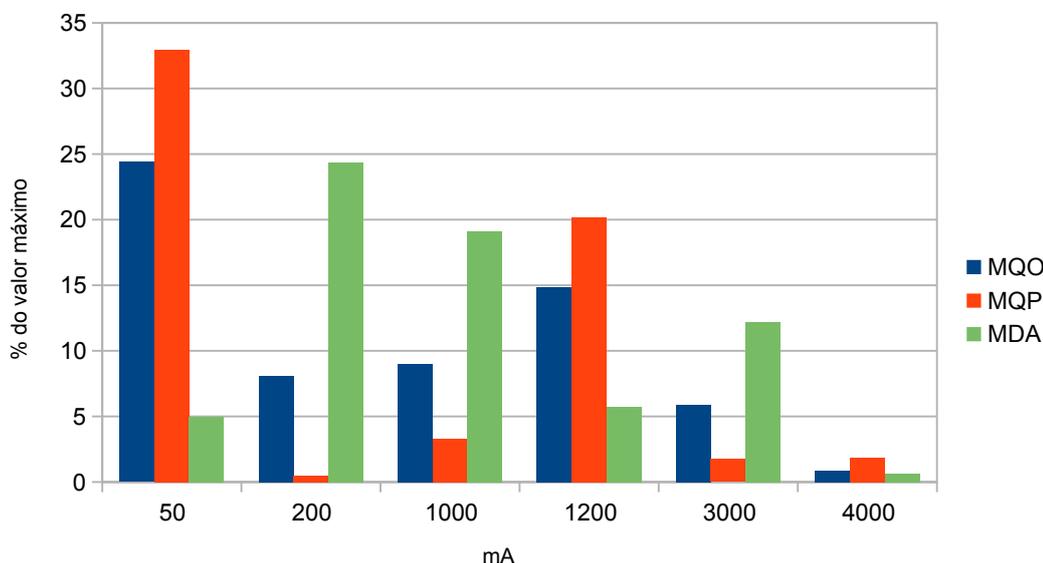
Fonte: Produzido pelo autor.

No caso da calibração do canal de tensão, nem mesmo para os pontos de erro máximo são obtidos resultados satisfatórios. A não-linearidade dos pontos é tão grande nesse canal que nem mesmo para os sinais com maior amplitude o erro é baixo o suficiente para atingir as especificações do fabricante.

#### 4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o intuito de avaliar os resultados dos três métodos de maneira simultânea, o gráfico da Figura 14 expõe a porcentagem do erro máximo trazido pelo fabricante que os sinais de corrente possuem após as calibrações utilizando sinais de 60Hz.

Figura 14 – Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de corrente com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA) em 60 Hz



Fonte: o autor.

Com isto, é possível observar que o Método dos Mínimos Desvios Absolutos foi capaz de minimizar o erro mais do que os outros métodos para o sinal de menor amplitude. No entanto, para a maioria dos pontos seguintes, este método trouxe erros superiores aos outros, apesar de continuar mantendo-se dentro das especificações do fabricante. Já no Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, os coeficientes obtidos geraram um maior erro para o ponto de menor amplitude, mas para os outros pontos este erro foi sempre menor que 15 % do permitido. Por fim, o Método dos Mínimos Quadrados ponderados trouxe o pior erro para o sinal com amplitude mais baixa, mas exceto pelo ponto de 1.2A no qual o erro ultrapassou os 20% do valor máximo fornecido pelo fabricante, o erro manteve-se menor que todos os outros métodos. De forma a resumir essa relação, a tabela 21 expõe a média dos erros para o canal de aquisição de corrente analisado.

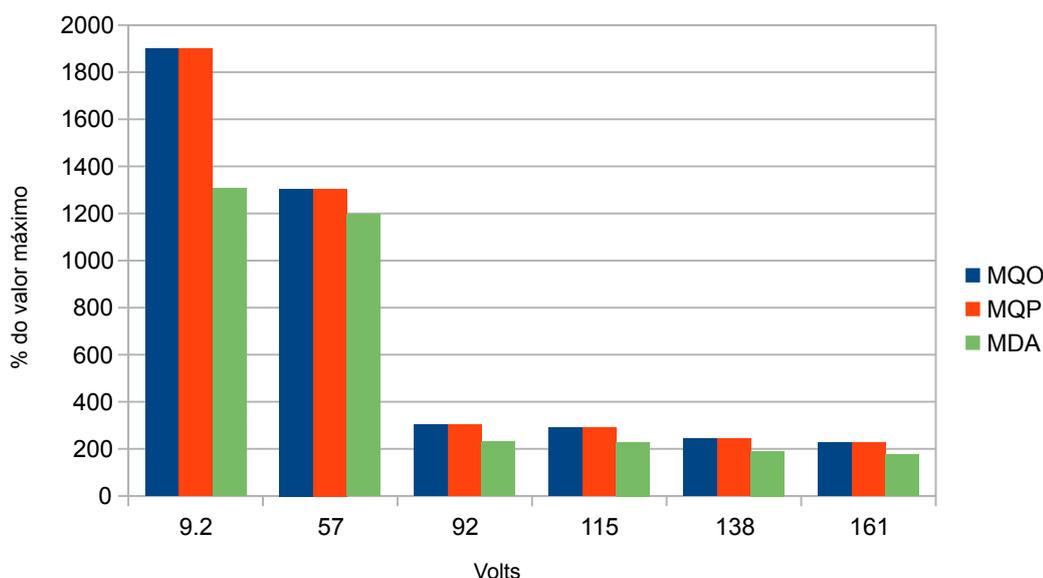
Tabela 21 – Média dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de corrente IA em 60 Hz.

Canal IA		
Erro Médio MQO (%)	Erro Médio MQP (%)	Erro Médio MDA (%)
10.5228	10.0768	11.1635

Fonte: Produzido pelo autor.

Fazendo a mesma análise utilizando o canal de tensão VC, observa-se que em nenhum dos métodos os resultado foi suficiente para que as leituras possuam erros menores do que os erros máximos fornecidos pelo fabricante. A Figura 15 ilustra esse resultado.

Figura 15 – Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA).



Fonte: o autor.

A tabela 22 expõe as médias dos erros obtidos nas três calibrações, em porcentagem do máximo permitido pelo fabricante.

Tabela 22 – Média dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 60 Hz.

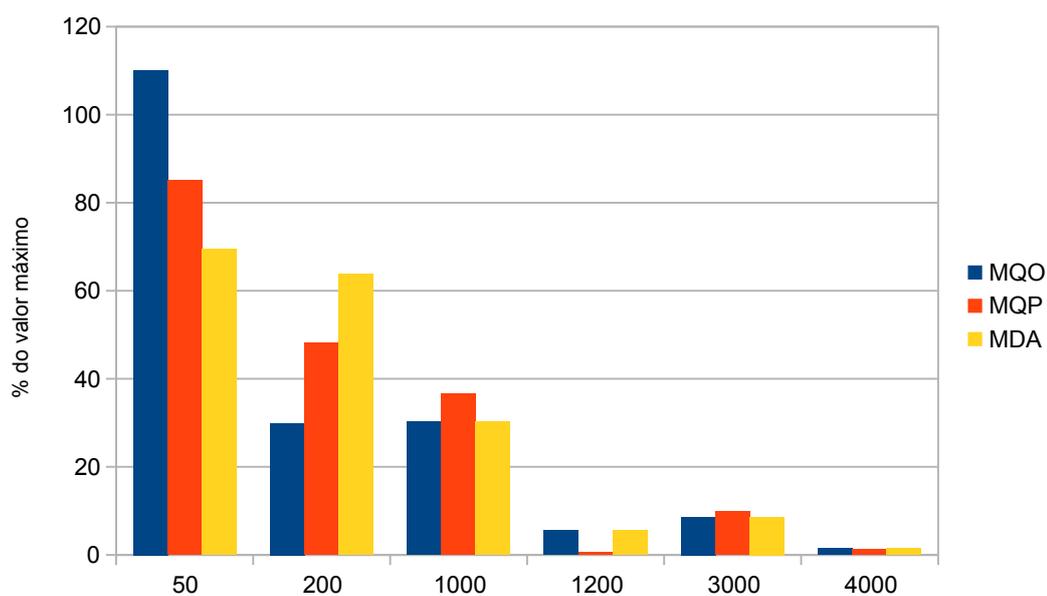
Canal VC		
Erro Médio MQO (%)	Erro Médio MQP (%)	Erro Médio MDA (%)
710.8315	710.8315	555.013

Fonte: Produzido pelo autor.

Da mesma forma, utilizando sinais de entrada de 50 Hz, temos os resultados expostos nas imagens 16 para corrente e 17 para tensão. No canal de corrente, os métodos de Mínimos Quadrados Ponderados e Mínimos Desvios Absolutos em primeira ordem são suficientes para compensar as leituras e deixar o equipamento dentro das especificações do fabricante. No método de Mínimos Quadrados Ordinários, o resulta-

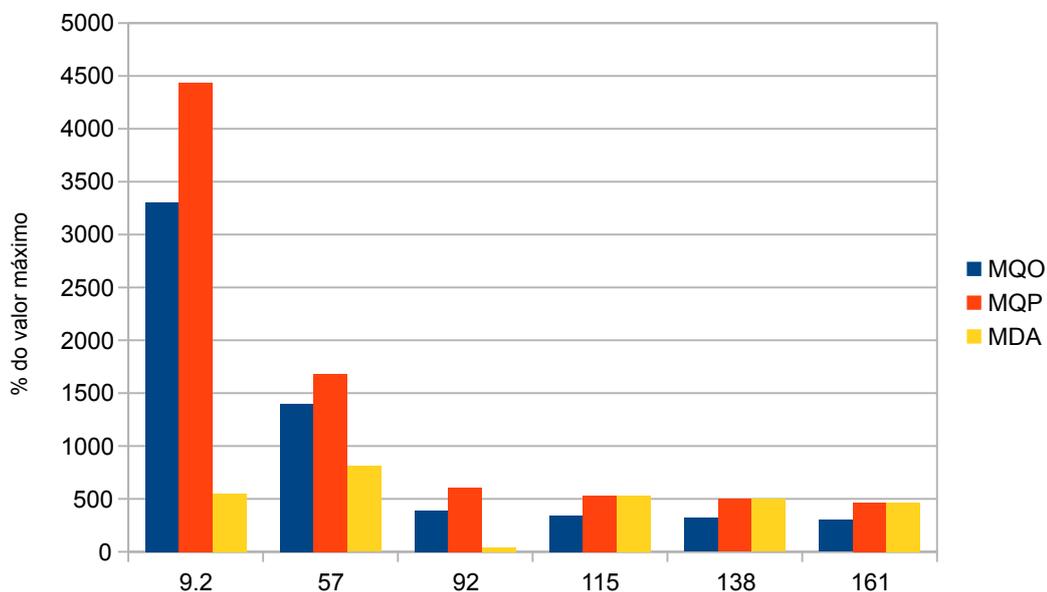
do mostra-se insuficiente para 50 mA. Já para o canal de tensão, da mesma forma que utilizando sinais de entrada com 60 Hz, nenhum dos três métodos é suficiente para a calibração em primeira ordem. As tabelas 21 e 22 expõem os erros médios após estas calibrações.

Figura 16 – Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de corrente com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA) em 50 Hz



Fonte: o autor.

Figura 17 – Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão em 50 Hz com maior erro por ciclo após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA).



Fonte: o autor.

Tabela 23 – Média dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de corrente IA em 50 Hz.

Canal IA		
Erro Médio MQO (%)	Erro Médio MQP (%)	Erro Médio MDA (%)
30.9858	30.258	29.8665

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 24 – Médias dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 50 Hz.

Canal VC		
Erro Médio MQO (%)	Erro Médio MQP (%)	Erro Médio MDA (%)
1008.6213	1369.9299	484.2613

Fonte: Produzido pelo autor.

Com o intuito de tentar diminuir estes erros, é proposta também uma calibração em segunda ordem para o canal de tensão. Neste caso, ao invés de tentar-se adequar os valores a uma reta, os valores são adequados a uma parábola. Diferentemente dos

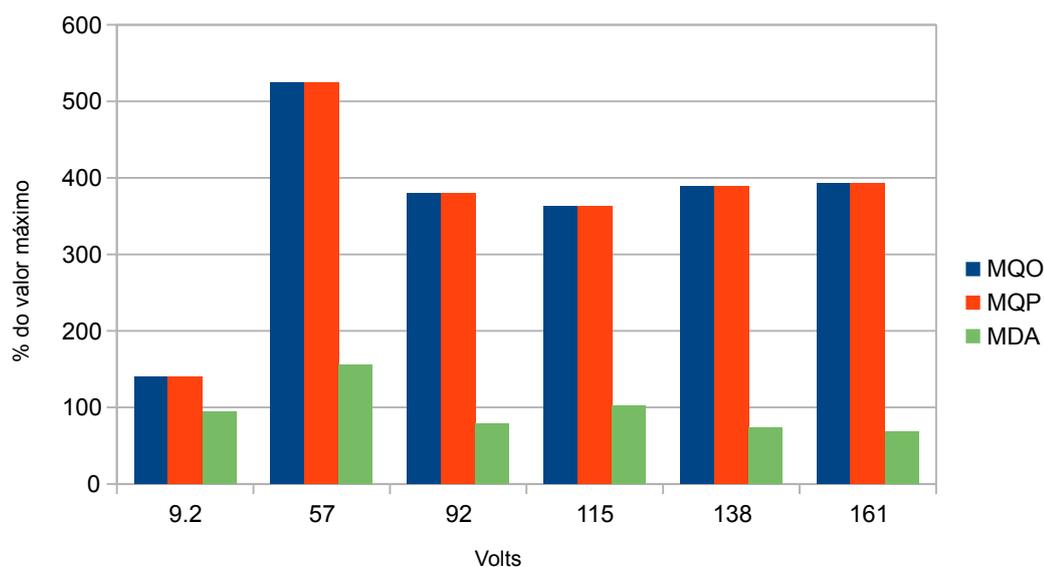
métodos em primeira ordem, em segunda ordem a equação que resolve a calibração é observada na equação 41.

$$y_i = \gamma x_i^2 + \beta x_i + \alpha \quad (41)$$

Neste caso, há um termo a mais,  $\gamma$ , capaz de compensar os erros em segunda ordem obtidos ao empregar os três métodos de calibração apresentados neste trabalho.

Os resultados desta proposta estão na Figura 18 para os três métodos descritos no capítulo anterior.

Figura 18 – Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão com maior erro por ciclo em 60 Hz após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA), todos em segunda ordem.



Fonte: o autor.

Como já é possível perceber, há uma substancial diminuição nos erros, principalmente utilizando a calibração de Mínimos Desvios Absolutos. Apenas os pontos de 57V e 115V os mínimos fornecidos pelo fabricante, o que vale dizer que para os outros quatro pontos o erro manteve-se menor que 0.1%. As médias dos erros após as linearizações em segunda ordem evidenciam ainda mais essa melhora e podem ser observadas na tabela 25.

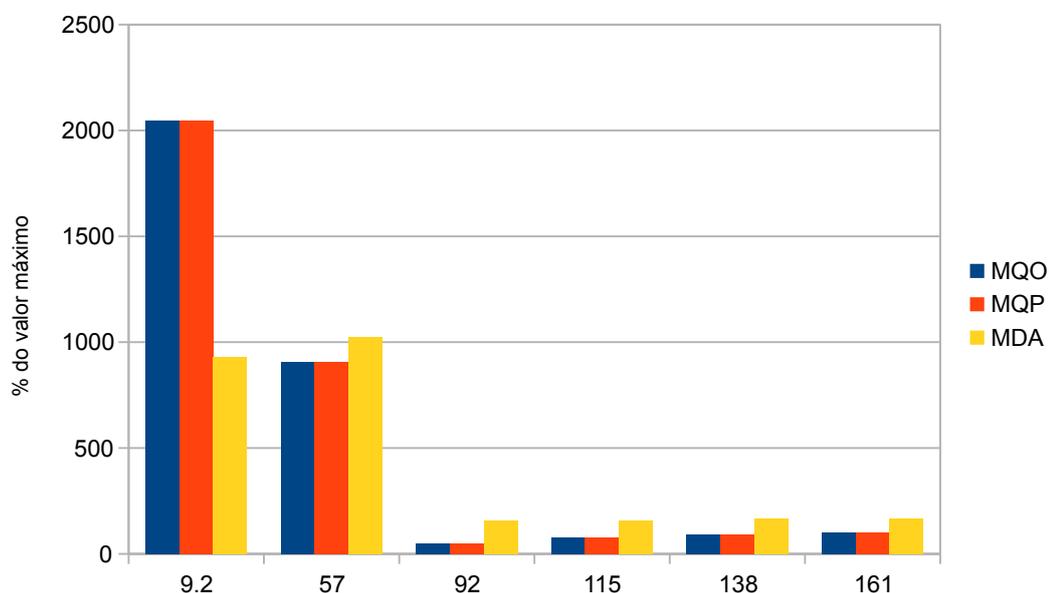
Tabela 25 – Médias dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 60 Hz após as calibrações em segunda ordem.

Canal VC		
Erro Médio MQO (%)	Erro Médio MQP (%)	Erro Médio MDA (%)
359.3539	359.3539	100.9507

Fonte: Produzido pelo autor.

Procedendo da mesma forma para a calibração em segunda ordem do canal VC com sinais de 50 Hz, são obtidos os resultados expostos na Figura 19. Similarmente aos resultados obtidos em 60 Hz, a calibração utilizando o Método de Desvios Absolutos trouxe os melhores resultados observando o erro médio entre todos os pontos, mas ainda assim, este método se mostrou insuficiente para adequar o canal de aquisição com as especificações fornecidas pelo fabricante. A tabela 26 expõe estes resultados.

Figura 19 – Porcentagem do erro máximo atingido para os sinais de tensão com maior erro por ciclo em 50 Hz após a aplicação do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) e do método dos Mínimos Desvios Absolutos (MDA), todos em segunda ordem.



Fonte: o autor.

Tabela 26 – Médias dos erros em relação ao máximo permitido pelo fabricante para o canal de tensão VC em 50 Hz após as calibrações em segunda ordem.

<b>Canal VC</b>		
<b>Erro Médio MQO (%)</b>	<b>Erro Médio MQP (%)</b>	<b>Erro Médio MDA (%)</b>
544.9508	544.9508	433.0842

Fonte: Produzido pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

Levando em conta as considerações feitas no capítulo 4, torna-se possível verificar a importância do emprego dos métodos de calibração para que as leituras executadas pelos canais de corrente e tensão apresentem menores erros em relação ao sinal aplicado pela fonte.

Utilizando como valores de entrada dos métodos os valores de corrente RMS nos quais o erro máximo por ciclo foi encontrado, as calibrações foram capazes de reduzir os erros das medições para dentro dos limites fornecidos pelo fabricante em sinais de 60Hz. Em sinais de 50Hz, apenas o método de mínimos quadrados ordinários se mostrou insuficiente no ponto de 50 mA, ainda assim, por apenas 0.03mA (10.1% a mais que o permitido). Os outros métodos obtiveram resultados suficientes. Apesar dos erros médios entre os métodos serem semelhantes, é bastante perceptível a vantagem do método de desvios absolutos em relação aos outros para o sinal mais baixo de corrente aplicado. Isto evidencia a aptidão deste método em relação aos *outliers*, uma vez que o ponto de 50 mA pode ser considerado um ponto com estas características. Outra particularidade interessante desta análise é que, para a corrente nominal da placa de aquisição (1 A), o algoritmo que gerou menor erro foi o método de Mínimos Quadrados Ponderados, demonstrando que, quando levado em conta na calibração os limites máximos informados pelo fabricante, a performance mostra-se superior na amplitude mais importante de toda a faixa de aquisição. Estes resultados expõem o caráter linear das medições utilizando os canais de corrente, característica esta que é essencial neste tipo de interface.

Já na análise dos canais de tensão, os resultados das calibrações não foram suficientes para compensar os sinais aplicados em nenhum dos testes efetuados. Isto evidencia uma pronunciada não-linearidade nas aquisições deste canal. De forma a tentar ainda mais um recurso visando diminuir os erros, foram empregadas linearizações de segunda ordem para este canal e estas trouxeram resultados promissores, principalmente para 60 Hz. Apesar da *Merging Unit* utilizada não permitir calibração com coeficientes de segunda ordem, esta técnica foi utilizada de forma a tentar propor uma solução para o problema encontrado. Entretanto, mesmo neste caso, ainda não existe uma margem de segurança razoável entre o erro obtido e o erro máximo em alguns pontos. Todavia, a diminuição dos erros em relação à calibração em primeira ordem aponta uma direção no sentido de diminuir os erros deste canal, visando tornar as medições mais próximas do proposto pelo fabricante.

Ao longo de todo este trabalho, deu-se foco às calibrações utilizando como valores de entrada os piores casos encontrados durante os ciclos RMS capturados, isto é: o valor RMS do ciclo que possuísse maior erro em relação à referência. Entretanto, uma outra análise que pode ser sugerida como um trabalho futuro é o uso das médias

entre os valores RMS de todos os ciclos de aquisição de cada sinal. Desde forma, possíveis *outliers* teriam menor importância, principalmente se a duração dos ciclos de aquisição forem ainda maiores dos que os adotados neste trabalho. Desta forma, as calibrações não seriam mais feitas utilizando o pior dos casos e sim os casos mais comumente observados.

## REFERÊNCIAS

BLOOMFIELD, Peter; STEIGER, William L. **Least Absolute Deviations**: Theory, applications and algorithms. Edição: Addison Wesley. Basel: Birkhäuser, Ltd., 1983. Citado nas pp. [25](#), [26](#).

CHATTERJEE, Samprit; HADI, Ali S. **Regression Analysis By Example**. 5. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons, 2012. Citado na p. [22](#).

DODGE, Yadolah. **The Concise Encyclopedia of Statistics**. 1. ed. New York City: Springer, 2008. Citado nas pp. [20](#), [26](#).

ELLIS, Steven P. Instability of Least Squares, Least Absolute Deviation and Least Median of Squares Linear Regression. **Statistical Science**, v. 13, n. 4, p. 337–344, 1998. Citado na p. [27](#).

FARCOMENI, Alessio; GRECO, Luca. **Robust methods for data reduction**. 1. ed. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC Press, 2015. Citado na p. [25](#).

FLUKE. **6105A/6100B Electrical Power Standards**. Everett, USA: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://br.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/6105a6100b-electrical-power-standards>>. Citado na p. [34](#).

IEEE. COMTRADE: a new standard for common format for transient data exchange. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 4, p. 1920–1926, 1992. Citado nas pp. [15](#), [30](#).

INSTITUTE OF ELECTRICAL e ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE/IEC C37.111-2013 International Standard**: Measuring relays and protection equipment – Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. Piscataway, New Jersey, EUA, jun. 2020. Citado na p. [30](#).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850-7-2:2010**: Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-2: Basic information and communication structure - Abstract communication service interface (ACSI). Geneva, out. 2020. P. 226. Citado nas pp. [14](#), [29](#).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61850-9-2:2011+AMD1:2020**: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Geneva, fev. 2020. P. 34. Citado na p. 15.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61869-13:2021**: Instrument transformers - Part 13: Stand-alone merging unit (SAMU). Geneva, mar. 2021. P. 226. Citado nas pp. 14, 35.

MCDONALD, John D. **Substation Automation Basics**: The Next Generation. Quebec, Canada: [s.n.], 2007. Disponível em: <<https://electricenergyonline.com/energy/magazine/321/article/Substation-Automation-Basics-The-Next-Generation.htm>>. Acesso em: 1 fev. 2021. Citado na p. 29.

STOCK, James H.; WATSON, Mark W. **Introduction to Econometrics**. Edição: Addison Wesley. 2. ed. New York City, New York: Pearson, 2006. Citado nas pp. 17, 20.

TACONELI, Cesar Augusto. **Modelos Lineares Generalizados**. Curitiba: [s.n.], 2016. Materiais de Aula. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~taconeli/CE22516/Aula3.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na p. 22.

TYPHOON HIL. **IEC 61850 Sampled Values protocol**. Somerville, Massachusetts, EUA, mar. 2020. Disponível em: <[https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/References/iec\\_61850\\_sampled\\_values\\_protocol.html](https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/References/iec_61850_sampled_values_protocol.html)>. Acesso em: 10 mar. 2021. Citado na p. 29.

WILLETT, John B.; SINGER, Judith D. Another Cautionary Note about R2: Its Use in Weighted Least-Squares Regression Analysis. **The American Statistician**, v. 42, n. 3, p. 236–238, 1988. Citado na p. 24.