

Técnica de Validação Cruzada para Qualificação do Ajuste das Curvas Tempo versus Corrente dos Elos Fusíveis do Tipo Expulsão

Augusto Zanin Bertoletti, Guilherme Braga da Costa, Adriano Peres de Moraes, Ghendy Cardoso Junior
Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (LAPES)
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Santa Maria, Brasil
augustozb1@gmail.com

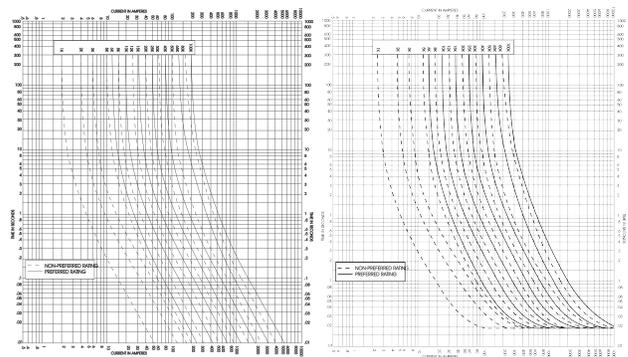
Resumo—O propósito desse trabalho é modelar e qualificar as curvas Tempo x Corrente dos elos fusíveis tipo expulsão. Para tal, usou-se o Método dos Mínimos Quadrados para ajustar os dados das curvas em diversas ordens de uma função matemática, determinada através de um *software* de adaptação linear. A escolha da ordem foi realizada empregando a técnica de Validação Cruzada, assim encontrando funções muito coerentes em relação ao comportamento do elo fusível, facilitando e agilizando os trabalhos e pesquisas que envolvem simulações digitais do mesmo.

Keywords – Ajuste de Curvas; Curvas Tempo x Corrente; Elo Fusível do tipo Expulsão; Validação Cruzada.

I. INTRODUÇÃO

O mais simples e básico dispositivo usado na proteção de sistemas elétricos de potência especialmente em redes de distribuição de energia elétrica, é a chave fusível. São dispositivos compostos de um elo fusível, que é a parte descartável do mesmo, que compõem-se quase inteiramente de um elemento condutor, que derrete quando a corrente atinge um valor projetado por um determinado período de tempo. Essa parte é necessária para a manutenção da chave fusível, que é substituída a cada atuação do mesmo, assim voltando a condição normal de operação. Geralmente o elemento fusível é fabricado de estanho, chumbo, ou em diferentes ligas de prata, para alcançar uma determinada característica tempo x corrente [1].

A indústria classifica em três tipos, o tipo K e T considerados mais rápidos e o tipo H mais lento. Por serem mais usados, neste trabalho será analisado os elos fusíveis do tipo K. Porém, quando se compara o tipo K ao T, chegamos ainda que o tipo K é relativamente mais rápido que os do tipo T. A quantificação da velocidade é padronizada por [2] diferentemente, dependendo da corrente nominal do elo. Ainda podemos subdividir os elos entre preferenciais e não-preferenciais, um critério relacionado a quão bem os mesmos coordenam entre si, sendo os preferencias, como o nome sugere, os mais escolhidos. São disponibilizados nas correntes 6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140, e 200 A para o tipo K.



(a) Curvas de Mínima Fusão da Eletrofusi. (b) Curvas de Máxima Interrupção da Eletrofusi.

Figura 1: TCC dos Fusíveis do tipo K da Eletrofusi.

O comportamento de um elemento fusível é definido pelos fabricantes através de suas curvas Tempo x Corrente (TCC - *Time-Current Characteristics*), compostas pela de Mínima Fusão (MM- *Minimum Melt*) e a de Máxima Interrupção (TC- *Total Clearing*), em escala logarítmica, tendo em vista que a sensibilidade do dispositivo é relativamente alta em uma faixa baixa de corrente. A curva MM caracteriza o tempo mínimo em que o fusível, a partir de cerca de 150% de sua corrente nominal, começa a fundir-se. Já a curva TC, representa o tempo em que a falta é totalmente extinta, incluindo se houver formação o arco-elétrico [3]. Um exemplo destas curvas é apresentado nas Figs. 1a e 1b.

Os elos fusíveis do tipo expulsão ganharam grande espaço no mercado, devido a sua simplicidade e facilidade no manuseio. Eles também são muito utilizados em diversos trabalhos acadêmicos a respeito de esquemas de proteção de distribuição, porém quando a pesquisa envolve a realização de simulações computacionais, torna-se imprescindível a sua correta modelagem digital. Conseguindo uma aproximação analítica da curva, simplificariamos e facilitaríamos o trabalho do engenheiro de proteção. Porém, é essencial a coerência desta aproximação com o comportamento real do dispositivo,

tendo em vista que a utilização de um modelo computacional errôneo causará um estudo falho de proteção. Valendo-se dos dados apresentados nas curvas TCC, há distintos tratamentos propostos na literatura para a modelagem de elos fusíveis. Neste trabalho têm-se o objetivo de qualificar a representação analítica para a coesa atuação destes dispositivos em simulações computacionais.

II. MODELAGEM DOS ELOS-FUSÍVEIS

Na literatura, é usado de forma extensiva a abordagem de interpolação linear, para as curvas MM e TC [4]–[7]. Em [4], que quando necessário, são construídas semirretas para estimativa do tempo em determinado valor de corrente. Autores em [5], usam técnicas de interpolação linear, porém chegam a conclusão que em escala logarítmica, as curvas podem ser inteiramente aproximadas por um polinômio de segunda ordem como mostra a equação 1.

$$\log(t) = a * \log(I)^2 + b * \log(I) + c \quad (1)$$

sendo,

- a , b e c os coeficientes a serem determinados.

Dentre várias opções de fabricantes de elos fusíveis do tipo expulsão, selecionamos a Eletrofusi Power Systems [8], julgado que é uma marca homologada por diversas concessionárias brasileiras. Das curvas fornecidas pelo fabricante, coletamos exatos 60 pontos de cada curva MM e TC dos elos 6, 10, 15, 25, 40, 65 e 100 K, uma vez que são os disponibilizados pelo fabricante em [9].

Para identificar uma função que melhor representa a característica tempo x corrente do elo fusível utilizou-se o *software TableCurve 2D*[®], da *Systat*, que em sua biblioteca, faz a análise do ajuste de mais de 8000 funções para um conjunto de pontos fornecido. A equação 2 é a mais indicada para quase todas as TCC, pelo *software*.

$$\log(t) = p_0 + \frac{p_1}{\ln(\log(I))} + \frac{p_2}{\ln(\log(I))^2} + \dots + \frac{p_n}{\ln(\log(I))^n} \quad (2)$$

sendo,

- $p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ são os coeficientes a serem determinados pelo ajuste;
- n é a ordem da função.

Foram analisados ajustes para n inteiro, de 1 até 15. Para a obtenção dos coeficientes da função selecionada 2, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados implementado no *software* MATLAB. O próprio *toolbox* de ajuste de curvas (*Curve Fitting Toolbox*TM) do MATLAB[®] [10] fornece parâmetros da qualidade do ajuste, como a Soma do Quadrado dos Resíduos (RSS - *Residual Sum of Squares*) e o Coeficiente de Determinação (R^2). Ambos foram averiguados, juntamente com uma análise referente ao uso de um método que avalia a capacidade de generalização de um modelo, a Validação Cruzada (CV - *Cross Validation*). Os dois primeiros são apenas

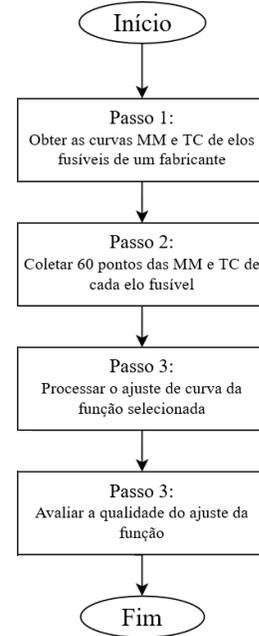


Figura 2: Fluxograma do procedimento realizado.

coeficientes que representam o erro associado com o valor estimado e o coletado, já o CV é uma técnica de predição que a partir de metodologias propostas, faz uso de parâmetros de erro para seleção de um modelo que melhor se ajusta a um conjunto de dados.

Todo o processo pode ser esquematizado pela metodologia disposta na Fig. 2.

III. CRITÉRIOS DE ANÁLISE E RESULTADOS

A equação 2 mostrou-se de grande precisão para o ajuste das curvas TC e MM dos fusíveis analisados. Um exemplo é apresentado na Fig. 3, das aproximações das TCC do elo 10K.

Porém, diferentes ordens da equação 2 foram analisadas. Desta forma, é necessário refinar os resultados, através dos

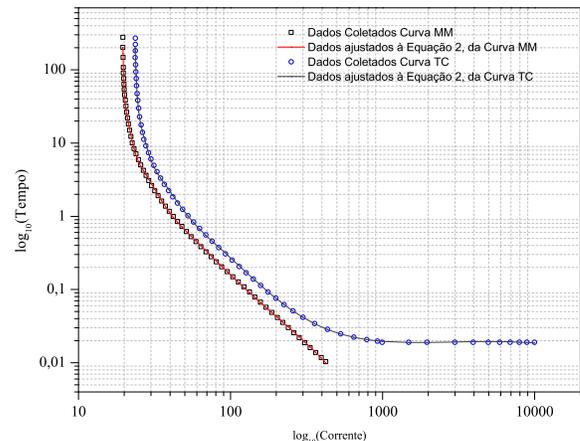


Figura 3: Modelagem das TCC do Elo 10K pela equação 2, de ordem $n=9$ para ambas MM e TC.

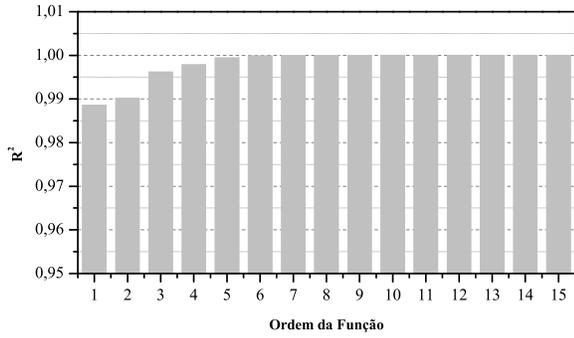


Figura 4: R^2 para o ajuste da curva MM do elo 65K.

parâmetros e técnicas mencionadas na seção anterior. Diferente do proposto em [5], que apresenta uma única ordem.

A. Coeficiente de Determinação

O coeficiente de determinação (R^2) é um parâmetro de teste de hipótese, fornece uma estimativa de quão precisamente o resultado obtido é replicado pelo modelo [11]. Porém, para a análise foram fornecidos os seguintes resultados deste parâmetro, por exemplo, para a curva MM do elo 65K, o resultado é apresentado na Fig. 4:

O valor é praticamente o mesmo para todas as ordens, o que torna difícil identificar a ordem n que melhor representa a curva. A diferença entre a ordem $n=2$ e $n=13$, por exemplo, é na terceira casa decimal para a curva MM do elo 65K. Não obstante, temos uma elevada discrepância nos resultados, como mostram as Figs. 5a e 5b. Ainda, é visivelmente difícil escolher entre as ordens 11, 12, 13 ou 14 por exemplo, portanto, este parâmetro tornou-se inviável para a análise.

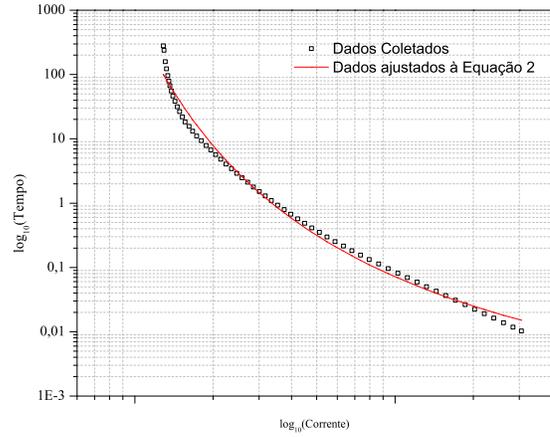
B. Soma dos Quadrados dos Resíduos

A Soma dos Quadrados do Resíduo é definido como a soma quadrática entre a diferença do valor obtido pela modelagem e o valor real. Logo, quanto menor o valor, melhor o modelo, pois mais se aproxima do valor real. O cálculo é realizado através da equação 3.

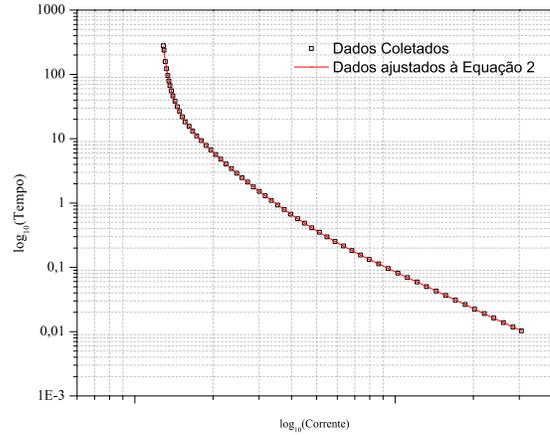
$$RSS = (Valor\ estimado - Valor\ original)^2 \quad (3)$$

Este parâmetro se mostrou um ótimo indicador da precisão do ajuste. A ordem que apresentou o menor RSS foi selecionada como o melhor ajuste da curva. Por exemplo, o resultado obtido para as curvas TC é apresentado na Tabela I, e os gráficos da curva ajustada com os pontos sobrepostos na Fig. 6.

O problema do uso desse critério para seleção da ordem é a questão de em qual ordem parar. Como vemos na Tabela I, a maioria das ordens selecionadas, foi a máxima ordem analisada o que consequentemente resulta em uso de modelos com maior complexidade e tempo computacional. Ressaltando que não há técnica por trás do RSS, é apenas um parâmetro de estimação do erro associado ao modelo, não há refinamento nos dados, avaliando melhor a repartição de dados.



(a) Curva MM do elo 65K ajustada pela função 2 de ordem 2 com os pontos coletados sobrepostos.



(b) Curva MM do elo 65K ajustada pela função 2 de ordem 13 com os pontos coletados sobrepostos.

Figura 5: Comparação gráfica da modelagem da Curva MM Elo 65K.

Tabela I: Ordens para os elos definidas pelo menor RSS obtido.

Elo	Ordem (n)	RSS
6K	10	0,0165
10K	12	0,0849
15K	14	0,0106
25K	15	0,0087
40K	15	0,0049
65K	15	0,0015
100K	15	0,0121

C. Validação Cruzada

Considerando os problemas que os indicadores acima apresentam para a distinção entre nossos modelos, foi usado um método extremamente recorrente no ramo da Ciência de Dados, a técnica de Validação Cruzada (CV - *Cross Validation*).

O método de CV abordado no presente trabalho, foi o k -fold. O conceito se resume em repartir os dados em K conjuntos, de tamanhos aproximados. Assim:

- Um conjunto é usado para testes;
- Os outros $K-1$ conjuntos, são usados para estimação de

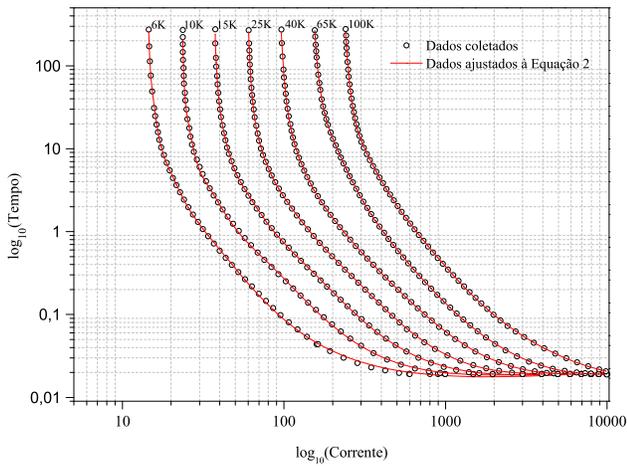


Figura 6: Curvas TC dos Fusíveis Tipo K da Eletrofusi.

parâmetros e cálculo de erro quadrático.

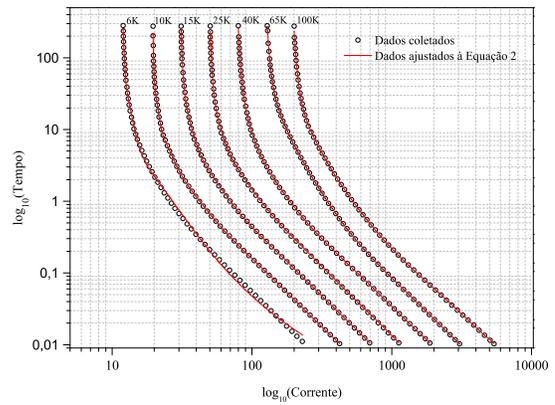
O processo é realizado K vezes, assim garantindo que todos os dados coletados sejam ao menos uma vez "conjunto de testes". No final das K iterações, o Erro Médio Quadrático (MSE - *Mean Square Error*) é calculado considerando os conjuntos.

É importante salientar que o processo descrito, avalia a capacidade de predição do modelo. Como objetivo da análise é encontrar a ordem n para a equação 2 que melhor representa o comportamento descrito pelas TCC dos elos fusíveis, o método *k-fold* foi realizado n vezes, compatibilizando com as ordens consideradas. A ordem que obtiver o menor MSE, é então selecionada.

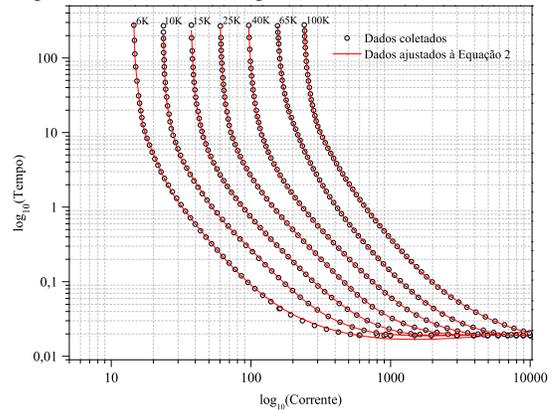
Os resultados obtidos são apresentados na Tabela II, utilizando sempre um número de partições K igual ao número de pontos, ou seja, sendo 1 conjunto para teste e o restante para treinamento. As curvas plotadas sobrepostas aos dados coletados na Fig. 7.

Tabela II: Resultados obtidos utilizando a técnica da Validação Cruzada

Curva	Mínima Fusão		Máxima Interrupção	
	Ordem	MSE	Ordem	MSE
6K	6	0.002383474	8	0.000676038
10K	13	0.000911432	9	0.002184957
15K	9	0.000729368	10	0.000595797
25K	13	0.001103618	15	0.000233911
40K	15	0.000138803	15	0.000173009
65K	15	3.02358E-05	14	4.94537E-05
100K	15	0.000298646	15	0.000290038



(a) Curvas MM da Eletrofusi ajustada à equação 2, com os pontos coletados sobrepostos.



(b) Curvas TC da Eletrofusi ajustada à equação 2, com os pontos coletados sobrepostos.

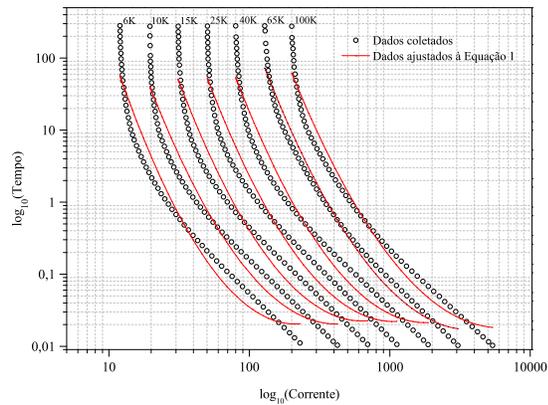
Figura 7: Resultado Final, após o uso da técnica da Validação Cruzada.

D. Comparação com a outra função proposta

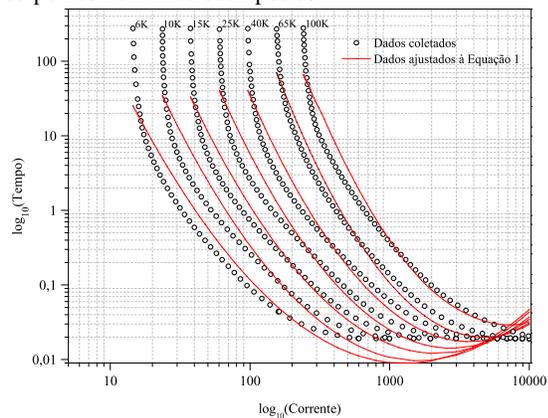
Foi aplicada a mesma metodologia à equação 1, com a intenção de comparação. Os valores do MSE encontrados estão apresentados na Tabela III. Além dos valores serem relativamente maiores (cerca de 10 vezes), foi feita a comprovação visual, de que o ajuste não é suficientemente preciso, como mostra a Fig. 8.

Tabela III: Valor do MSE encontrado, aplicando a técnica de Validação Cruzada ao ajuste das TCC à equação 1

Elo	MM	TC
	MSE	
6K	0.074581	0.094583
10K	0.076292	0.109423
15K	0.084579	0.076667
25K	0.08181	0.075684
40K	0.066819	0.058582
65K	0.032734	0.039208
100K	0.044837	0.048894



(a) Curvas MM da Eletrofusi ajustada à equação 1, com os pontos coletados sobrepostos.



(b) Curvas TC da Eletrofusi ajustada à equação 1, com os pontos coletados sobrepostos.

Figura 8: Resultado Final do ajuste dos pontos coletados à equação 1.

IV. CONCLUSÃO

Os elos fusíveis são vastamente utilizados na proteção de redes de distribuição, logo torna-se importantíssimo elevada precisão de modelagem de seu comportamento, por meio das TCC dos mesmos. Assim, para o engenheiro de proteção poder conduzir estudos de coordenação e seletividade de forma rápida, coerente e simples.

Neste artigo abordamos uma função não encontrada na literatura para este propósito, para modelar as curvas de mínima fusão e de máxima interrupção dos elos fusíveis preferenciais do tipo K da Eletrofusi. No entanto, os procedimentos adotados podem ser utilizados para qualquer elo fusível, desde que levantados alguns pontos para a aplicação do método de ajuste de curvas. O *toolbox* do MATLAB[®] foi utilizado para determinar os coeficientes da equação 2 para cada curva e avaliados por parâmetros de erros, fornecidos junto com os coeficientes. Porém, mostrou-se mais interessante utilizar a técnica de Validação Cruzada para determinar o grau que melhor ajusta a curva, depois comprovados de forma visual, como ótimos resultados.

Com isso, esperamos contribuir fortemente com estudos de proteção de redes de distribuição, principalmente no viés aca-

dêmico, assim facilitando o uso do elos fusíveis em ambientes computacionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFSM pela estrutura de pesquisa e ao CNPq pelas bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Anderson, P. Anderson, and M. Eden, *Power System Protection*, 1999.
- [2] *IEEE Std C37.40-1993*. IEEE., 1993. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=n10WtAEACAAJ>
- [3] L. L. Grigsby, *The Electric Power Engineering Handbook*, 01 2001.
- [4] J. J. G. Ledesma, L. R. De Araujo, D. R. R. Penido, and J. L. R. Pereira, "Algorithm for the Analysis of Coordination of Protection for Distribution Systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2168–2175, 2015.
- [5] S. Chaitusaney and A. Yokoyama, "Prevention of reliability degradation from recloser-fuse miscoordination due to distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2545–2554, 2008.
- [6] A. F. Naiem, Y. Hegazy, A. Y. Abdelaziz, and M. A. Elsharkawy, "A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 176–185, 2012.
- [7] A. Fazanehrafat, S. A. M. Javadian, S. M. T. Bathaee, and M. . Haghifant, "Maintaining the recloser-fuse coordination in distribution systems in presence of dg by determining dg's size," in *2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008)*, March 2008, pp. 132–137.
- [8] Eletrofusi, "Eletrofusi Power Systems," <http://www.eletrofusi.com.br/>, 2018, [Online; Acessado em 25/07/2018].
- [9] —, "Curvas de Fusão Elos Fusíveis Eletrofusi Power Systems," http://www.eletrofusi.com.br/port/curvas_port.htm, 2018, [Online; Acessado em 25/07/2018].
- [10] MathWorks, *MATrix LABORatory (MATLAB®)*. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- [11] S. A. Glantz, B. K. Slinker, and T. B. Neilands, *Primer of applied regression & analysis of variance*. McGraw-Hill Medical Publishing Division, 2016.