

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO SILVA DA ROCHA

Porto Alegre

2021

GUSTAVO SILVA DA ROCHA

**DETECÇÃO DE ARCO TIPO SÉRIE: ESTUDO DE CASO
ATRAÉS DO USO DA TRANSFORMADA WAVELET E
MÁQUINAS DE VETORES DE SUPORTE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana

Porto Alegre

2021

GUSTAVO SILVA DA ROCHA

**DETECÇÃO DE ARCO TIPO SÉRIE: ESTUDO DE CASO
ATRAÉS DO USO DA TRANSFORMADA WAVELET E
MÁQUINAS DE VETORES DE SUPORTE**

Esta dissertação foi julgada adequada para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica e aprovada em sua forma final pelo
Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana, UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lino José Forte Marques, Universidade Coimbra (UC)

Doutor pela Universidade de Coimbra – Coimbra, Portugal

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, Universidade da Flórida (UF)

Doutor pela Virginia Tech – Blacksburg, Estados Unidos

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
(UFRGS). Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
(UFRGS)- Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE:

Prof. Dr. Sérgio Haffner

Porto Alegre, junho de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Fernanda e filhas, Marina e Luísa, pela compreensão, amor e suporte, essenciais para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por proporcionar um ensino gratuito e de excelência e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Em especial, ao meu orientador, prof. Dr. Daniel da Silva Gazzana, pelas inestimáveis contribuições para este trabalho.

RESUMO

Danos na fiação e em conexões elétricas podem resultar em incêndios através das chamadas faltas arco. Os dispositivos de proteção convencionais, como disjuntores, fusíveis e disjuntores diferenciais residuais não são capazes, muitas vezes, de identificar esse defeito. Os equipamentos chamados *AFDI*, do inglês, *Arc Fault Device and Interrupter*, surgiram nas últimas duas décadas buscando suprir essa lacuna. Contudo, a sua aplicação e eficiência ainda são restritas devido, entre outros motivos, ao chamado efeito de mascaramento gerado por alguns tipos de carga, que dificultam a identificação da ocorrência da falta arco. Para este fim, novas técnicas de detecção vêm sendo estudadas com o objetivo de desenvolver dispositivos mais confiáveis. Estudos relacionados a ferramentas estatísticas e de análise de sinais no domínio da frequência, associadas a metodologias de aprendizagem de máquina, demonstram resultados promissores no desenvolvimento de técnicas alternativas de detecção do arco. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial dos dados extraídos a partir da transformada wavelet na detecção da falta arco. Para isto foi construído um gerador de arco possibilitando o ensaio de cargas variadas na presença do fenômeno. Com base nos resultados obtidos foi possível construir um modelo inteligente, através da Máquina de Vetores de Suporte (*SVM*), que atingiu uma *accuracy* próxima a 90% na identificação da falta arco, mesmo em condições críticas de detecção.

Palavras-chave: *AFDI*. Incêndios Elétricos. Falta Arco Série. Máquina de Vetores de Suporte. Transformada Wavelet.

ABSTRACT

Damage to wiring and electrical connections can result in fires through so-called arc faults. Conventional protection devices such as circuit breakers, fuses and residual-current circuit breakers are often unable to identify this defect. The equipment called Arc Fault Device and Interrupter (AFDI) appeared in the last two decades seeking to fill this gap. However, its application and efficiency are still restricted due, among other reasons, to the masking effect generated by some types of load, which is difficult to identify the occurrence of this transient. New arc fault detection techniques are being studied with the objective of developing more reliable devices. Studies related to statistical tools and signal analysis in the frequency domain, associated with machine learning methodologies, demonstrate promising results in the development of alternative arc detection techniques. In this context, the objective of this work is to evaluate the potential of the data extracted from the wavelet transform in the detection of the arc fault. For this purpose, an arc generator was built, enabling the testing of various loads in the presence of the phenomenon. Based on the results obtained it was possible to build a classifier model, using the concepts Support Vector Machine (SVM), which reached almost accuracy of 90% in the identification of the arc fault, even under critical detection conditions.

Keywords: *AFDI*. **Electric Fires. Series Arc Fault Detection. Support Machine Vectors (SVM). Wavelet Transform.**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Ponto de aquecimento com formação de oxido metálico.	20
Figura 2	- Arco série (a) e arco paralelo (b).	22
Figura 3	- Arco por caminho carbonizado e ponte derretida em cabo danificado.	24
Figura 4	- Circuito elétrico equivalente da falta arco série.	25
Figura 5	- Circuito equivalente simplificado de um arco elétrico.	25
Figura 6	- Simulação falta arco.	26
Figura 7	- Sinais de corrente e tensão em circuito com falta arco.	27
Figura 8	- Esquema de detecção dos dispositivos <i>AFDI</i> (Siemens).	28
Figura 9	- Princípios de funcionamento do <i>AFDI</i> (Siemens).	29
Figura 10	- Decomposição em múltiplas resoluções através da (TW).	33
Figura 11	- Sinais da decomposição TW em 3 níveis.	34
Figura 12	- Modelo classificador.	37
Figura 13	- Superfície de separação (hiperplano) dentre duas classes.	39
Figura 14	- Superfície de separação (hiperplano) dentre duas classes.	40
Figura 15	- Superfície de separação (hiperplano) dentre duas classes.	42
Figura 16	- Truque do kernel, adaptado de.	43
Figura 17	- Curva ROC, adaptado de.	46
Figura 18	- Método com resubstituição.	48
Figura 19	- Método <i>holdout</i>	49
Figura 20	- Método de validação cruzada (CV) <i>k-fold</i>	50
Figura 21	- Fluxograma da metodologia desenvolvida.	52
Figura 22	- Teste arco por caminho carbonizado (UL 1699).	54
Figura 23	- Teste falta arco ponto de contato (UL 1699).	54
Figura 24	- Esquema do gerador de arco construído.	55
Figura 25	- Eletrodos utilizados na construção do gerador de arco.	56
Figura 26	- Primeiro protótipo do gerador de arco.	57
Figura 27	- Segundo protótipo gerador de arco regulagem da fenda.	58
Figura 28	- Aquecedor de ambientes (equipamento 3).	60
Figura 29	- Secador de cabelo (equipamento 13).	60
Figura 30	- Furadeira de impacto (equipamento 4).	60
Figura 31	- Aspirador de pó (equipamento 7).	61
Figura 32	- Serra circular (equipamento 10).	61
Figura 33	- Composição das cargas de 1 a 18.	62
Figura 34	- Equipamentos, cargas e medições.	65
Figura 35	- Esquema genérico de teste com e sem falta arco tipo série.	65
Figura 36	- Esquema do ensaio de cargas sem falta arco série.	67
Figura 37	- Esquema de ensaio de cargas com falta arco série.	67
Figura 38	- Corrente da carga sem arco (superior) e com arco (inferior).	68
Figura 39	- Sinal de corrente com arco (superior) e <i>dI</i> da TW (inferior).	69

Figura 40 - Sinais de corrente e $d1$, sem arco (esquerda) e com arco (direta).	70
Figura 41 - Gráfico dos detalhes da TW com e sem arco.	72
Figura 42 - Sobreposição do sinal dos $d5$ da carga com e sem arco série.....	73
Figura 43 - Potência do sinal do nível de detalhe $d5$ de carga resistiva com arco (direita) e sem arco (esquerda).	74
Figura 44 - Gráfico de dispersão utilizando a potência do sinal do detalhe $d5$	75
Figura 45 - Sinais externos utilizados para teste do modelo	77
Figura 46 - Corrente da Carga 4 (Pulverizador 588 VA).	80
Figura 47 - Corrente da Carga 8 (2 Aquecedores de Água 220 V/1414 VA).	80
Figura 48 - Corrente da Carga 11 (Serra Circular 756 VA).	81
Figura 49 - Intervalo valor da potência dos sinais $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ e $d5$	83
Figura 50 - Histograma do valor da potência dos sinais $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ e $d5$	84
Figura 51 - Matriz de dispersão de todos os fatores envolvidos.	85
Figura 52 - Matriz de dispersão da potência do sinal vs potência dos detalhes.	86
Figura 53 - Resultado do Modelo A.	88
Figura 54 - Resultado do Modelo B.	90
Figura 55 - Resultado do Modelo C.	92
Figura 56 - Resultado do Modelo D	93
Figura 57 - Teste do Modelo E.....	95
Figura 58 - Pontos da curva <i>ROC</i> dos modelos com validação cruzada.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de Confusão.	44
Tabela 2 - Interpretação da <i>AUROC</i>	47
Tabela 3 - Equipamentos elétricos utilizados	59
Tabela 4 - Característica das cargas utilizadas, em operação normal.....	63
Tabela 5 - Variação das características das cargas 37 cargas utilizadas.....	64
Tabela 6 - Decomposição wavelet para frequência de amostragem de 40 kHz.....	71
Tabela 7 - Tabulação dos dados obtidos nos ensaios.....	74
Tabela 8 - Amostra da potência das dez primeiras medições	82
Tabela 9 - Variação de potência nos 70 ensaios	82
Tabela 10- Análise linear discriminante para detecção do arco série.	86
Tabela 11- Teste com dados externos - Modelo A	89
Tabela 12- Teste com dados externos – Modelo B.....	90
Tabela 13- Teste com dados externos – Modelo C.....	92
Tabela 14- Teste com apenas <i>d5</i> – Modelo D.....	94
Tabela 15- Teste do com os dados externos e os 5 níveis de detalhes - Modelo E.	95
Tabela 16- Validação dos modelos classificadores.	96
Tabela 17 – Potência dos sinais dos sinais de detalhes das 70 medições	106

LISTA DE ABREVIATURAS

AFCI Arc-Fault Circuits and Interrupters

AFDI Arc Fault Device and Interrupter

AUROC Area Under Receiver Operating Characteristics

BT Baixa Tensão

d1 Nível de Detalhe 1 da transformada wavelet

Db Transformada wavelet baseada na família Daubichies

DDR Disjuntor Diferencial Residual

EMD Modo de Decomposição Empírica

F.P Fator de Potência

FFT Transformada Rápida de Fourier

FN Falso Negativo

FP Falso Positivo

FPR False Positive Rate

GL Grau de Liberdade

HSA Análise Espectral de Hilbert

QM Quadrado das Médias

ROC Receiver Operating Characteristics

RSSI Received Signal Strength Indication

MVS Máquina de Vetores de Suporte

SQ Soma dos Quadrados

SVD Singular Value Decomposition

SVM Support Vector Machine

TCZ Transformada Chirp Zeta

TDH Taxa de Distorção Harmônica

TF Transformada de Fourier

TFTC Transformada de Fourier de Tempo Curto

TPR True Positive Rate, Recall ou Sensitivity

TW Transformada Wavelet

TWC Transformada Wavelet Contínua

UL Underwriters Laboratories

VN Verdadeiro Negativo

VP Verdadeiro Positivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	PERIGOS DA FALTA ARCO EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA	19
2.2	CARACTERIZAÇÃO DA FALTA TIPO ARCO	21
2.3	ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA DETECÇÃO DA FALTA ARCO	27
2.4	EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DA FALTA ARCO TIPO SÉRIE	30
2.5	MODELOS INTELIGENTES NA DETECÇÃO DA FALTA ARCO	35
2.5.1	Conceitos Sobre Máquinas De Aprendizagem	36
2.5.2	Máquina De Vetores De Suporte	37
2.5.3	Métricas de Desempenho	44
2.5.4	Construção e Validação De Modelos Inteligentes	47
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	51
3	METODOLOGIA	52
3.1	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO GERADOR DE FALTA ARCO SÉRIE	52
3.2	SELEÇÃO DE CARGAS	58
3.2.1	Características Elétricas Dos Equipamentos	58
3.2.2	Composição Das 37 Cargas Utilizadas	61
3.3	ENSAIOS COM E SEM ARCO ELÉTRICO	64
3.3.1	Instrumentação Utilizada	65
3.3.2	Esquema De Ligação	66
3.3.3	Realização Das Medidas	67
3.3.4	Frequência De Amostragem	68
3.4	EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS	70
3.5	MODELO INTELIGENTE SVM	75
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1	INSPEÇÃO VISUAL DOS SINAIS	79
4.2	TABULAÇÃO DOS DADOS	81
4.3	ANÁLISES GRÁFICAS E ESTATÍSTICAS	82
4.4	DESEMPENHO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS	87
4.4.1	Modelo A	87
4.4.2	Modelo B	89
4.4.3	Modelo C	91
4.4.4	Modelo D	93
4.4.5	Modelo E	94
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	97
5	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	103

APÊNDICE 1 - Potência dos sinais e dos 5 níveis de detalhes da TW	106
APÊNDICE 2 - Sinais de corrente com e sem arco das 37 cargas	109
APÊNDICE 3 - Equipamentos utilizados nos ensaios	128
APÊNDICE 4 - Tabela de cargas utilizadas nos ensaios.....	135

1 INTRODUÇÃO

O curto-circuito, na maioria das vezes, é indicado como a causa principal de incêndios de origem elétrica. Contudo, ainda que o curto-circuito esteja presente na maioria das situações, ele muitas vezes não é a causa, mas sim a manifestação de algum defeito na instalação elétrica. Os dispositivos de proteção convencionais, fusíveis, disjuntores e DDRs (Disjuntor Diferencial Residual), não são capazes de proteger a instalação de alguns defeitos potencialmente perigosos antes de causarem prejuízos, como é o caso da ocorrência da falta arco. Essa manifestação patológica pode surgir por envelhecimento ou por danos em fios elétricos, estando ainda associada ao aquecimento pontual de conexões com baixa pressão de contato. Tais situações são frequentemente encontradas em instalações elétricas residenciais e podem ocultar o início de uma reação em cadeia lenta, mas capaz de causar um curto-circuito e resultar em um incêndio através do efeito termoeletrico (geração de calor através da eletricidade).

Os processos envolvendo a falta arco costumam ser lentos em função da baixa energia dissipada pelas cintilações em baixa tensão. Essa energia, porém, pode ser capaz de provocar reações físico-químicas relevantes aos componentes elétricos. Os polímeros utilizados como isolantes elétricos em fios podem sofrer degradação e formar os chamados caminhos carbonizados, comprometendo o circuito em questão. O calor também pode gerar a formação de óxidos metálicos em contatos elétricos. Os efeitos da formação desses óxidos são extremamente perigosos. Com a alteração da resistência de contato, através do efeito Joule, podem surgir pontos de aquecimento com temperaturas superiores à 1200 °C. Tal situação é agravada pelo fato de que a grande maioria das conexões elétricas e emendas não estão visíveis, dificultando sua identificação no estágio

inicial. A falta arco, portanto, é um fenômeno lento, de difícil identificação e capaz de causar graves consequências.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo geral deste trabalho é a condução de um estudo de caso visando contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia robusta e confiável para a detecção precoce da falta arco tipo série. Para atingir este fim maior, destacam-se os seguintes objetivos específicos: *(i)* obtenção de sinal de corrente elétrica sem a necessidade da utilização de transdutores de alta frequência, *(ii)* avaliação de uma técnica fidedigna para a análise do sinal de corrente elétrica através da extração de parâmetros através do uso da análise multiresolução da transformada Wavelet; *(iii)* implementação de modelo inteligente através da Máquina de Vetores de Suporte (SVM), com bom desempenho, possibilitando a correta distinção entre condições com e sem falta; *(iv)* concepção de metodologia integrada de detecção e diagnóstico de falta arco tipo série.

Dentre as principais contribuições ao estado da arte atribuídas a esta pesquisa destacam-se: *(i)* consideração de baixa frequências para a identificação da falta em questão, atribuindo facilidades de instrumentação sem a necessidade da utilização de transdutores especiais, os quais são usados em alguns dispositivos disponíveis comercialmente; *(ii)* decomposição espectral, em baixa frequência, por meio da transformada wavelet (TW) possibilitando a extração de padrões indicativos da presença da falta arco; *(iii)* consideração de modelo classificador baseado em aprendizagem por máquina de vetores de suporte (SVM), o classificou corretamente quase 90% das medidas de validação. *(iiii)* Geração de uma base de dados experimentais que viabilizem novos estudos acerca do tema. Destaca-se ainda como contribuição atribuída a esta pesquisa a

concepção de uma metodologia de relativa simplicidade no processamento do sinal de corrente necessário para obtenção dos parâmetros a serem utilizados pelo modelo classificador. Outro aspecto significativo é que tais informações não estão relacionadas a taxas de variação de grandezas, mas sim aos valores absolutos. Essa característica possibilita a classificação de uma amostra do sinal sem a necessidade de um monitoramento em tempo integral. Por fim, estes fatos viabilizam, a aplicação do estudo em inspeções periódicas de instalações elétricas para a certificação de sua integridade.

1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a quantidade de incêndios de origem elétrica que ocorrem anualmente, torna-se extremamente relevante a busca do desenvolvimento de dispositivos capazes de aumentar a confiabilidade das instalações. Nesse sentido, a detecção precoce da falta arco série pode aumentar substancialmente a segurança em instalações elétricas de baixa tensão (BT), incluindo as residenciais, comerciais e industriais.

Atualmente, existem no mercado dispositivos destinados a proteger a instalação contra esse tipo de fenômeno, que são os chamados AFDI, sigla do inglês para *Arc Fault Detection and Interrupter*. Contudo, eles ainda são pouco utilizados e sua confiabilidade é questionada. Por esse motivo, há uma série de pesquisas sobre novos métodos de detecção a fim de tornar esse tipo de dispositivo mais confiável. Essa, porém, não é uma tarefa trivial, tendo em vista o efeito chamado de “mascaramento” causado por alguns tipos de equipamentos. Essas cargas causam distorções na rede elétrica muito semelhantes às causadas pela falta arco, por isso dificultam a sua identificação.

Segundo a bibliografia consultada, a transformada wavelet (TW) vem apresentando excelentes resultados para extração de dados característicos desse tipo de

fenômeno. Esses dados Associados à modelos inteligentes podem ser uma alternativa viável de implementação em escala comercial. Um dos modelos inteligentes mais utilizados na atualidade é a Máquina de Vetores de Suporte (SVM) quem em algumas situações mostra-se superior às Redes Neurais Artificiais.

Deste modo, os argumentos aqui apresentados são os principais fatores de motivação para a condução desta pesquisa.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, introdução, revisão da literatura, metodologia, resultados e discussão, além do capítulo de conclusão.

No capítulo 2, Revisão da Literatura, estão discutidos pontos pertinentes, em seu estado da arte, relacionadas ao tema desta dissertação, os quais serviram de base teórica para a idealização deste trabalho. Esse capítulo está subdividido em seis principais tópicos: perigos da falta arco em uma instalação elétrica; caracterização da falta tipo arco; análise no domínio da frequência para a detecção da falta arco; modelos classificadores por máquina de aprendizagem e considerações finais.

No capítulo 3, Metodologia, aborda-se a construção do protótipo, baseado na norma UL 1699 (UNDERWRITERS LABORATORIES INC., 1999), o qual é utilizado para a geração da falta arco junto as cargas utilizadas nos experimentos. A descrição dos ensaios realizados, bem como dos instrumentos utilizados, também é apresentada nesse capítulo. Outro trecho trata sobre a análise e decomposição dos sinais de corrente de carga através da TW. São, também, apresentadas algumas análises estatísticas realizadas com os parâmetros experimentais obtidos que indicaram a influência da falta arco nos valores da potência dos sinais de detalhe da decomposição realizada. Para que fosse possível

avaliar de forma objetiva o potencial desses parâmetros na detecção, também é discutida a implementação do modelo classificador baseado em máquina de vetores de suporte, sigla do inglês SVM, técnica usada para a validação desta metodologia

No capítulo 4, Resultados e Discussões, são apresentados os resultados de desempenho na detecção da falta arco dos modelos matemáticos propostos com base na TW. São então descritos os 5 diferentes modelos avaliados para o processo de treinamento e validação. Também é apresentado o detalhamento dos dados de entrada utilizados.

O capítulo 5, Conclusões, apresenta uma análise crítica da metodologia proposta, incluindo constatações sobre os pontos frágeis do estudo, suas potencialidades, além de sugestões para trabalhos futuros.

Complementando o escopo desta dissertação, os anexos 1 ao 5 mostram em detalhes as cargas utilizadas assim como os dados e gráficos obtidos através dos experimentos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os incêndios de origem elétrica são aqueles causados diretamente pelo fluxo de corrente elétrica ou por eletricidade estática (BABRAUSKAS, 2008). Esse tipo de incêndio representou 13%, em média, de todas as ocorrências registradas em residências nos Estados Unidos entre os anos de 2012 e 2016 (CAMPBELL, 2019). Na Europa, esse número chega à 30% e na Índia supera os 70%. Uma parte muito expressiva desses incidentes são decorrências da falta tipo arco série, que poderiam ser evitadas com a utilização de dispositivos de proteção adequados (MARTEL, 2018).

Nesse contexto, o presente capítulo busca trazer, de forma ampla, uma relação de estudos e conceitos teóricos que fundamentam o trabalho realizado. São abordados, nesta seção, os perigos do arco elétrico, a caracterização do fenômeno, assim como metodologias alternativas para sua identificação precoce. As variações de abordagens utilizadas nessas metodologias estão fundamentadas em conceitos estatísticos e na extração de parâmetros no domínio da frequência, capazes de indicar a existência da anomalia. Também são apresentados alguns estudos da associação desses parâmetros à construção de modelos matemáticos para a classificação, baseados em conceitos de aprendizagem de máquina.

2.1 PERIGOS DA FALTA ARCO EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA

Mesmo com uma baixa liberação de energia térmica, a falta arco pode gerar sérios problemas em uma instalação elétrica. O calor gerado pelo fenômeno pode causar, de forma lenta e gradual, o comprometimento da camada de isolamento elétrico do condutor e também desencadear um processo de formação de óxidos metálicos em conexões elétricas com baixa pressão de contato. Esses óxidos têm a capacidade de provocar

aquecimentos pontuais que podem chegar a altas temperaturas em função da alteração das características físicas na superfície de contato. Pode-se observar na Figura 1 a formação do óxido metálico em um ponto de sobreaquecimento em terminal de uma tomada elétrica provocado por falta de aperto.

Figura 1 - Ponto de aquecimento com formação de óxido metálico.



Fonte: (HADZIEFENDIC; TRIFUNOVIC; KOSTIC, 2018).

Ainda que esses óxidos sejam semicondutores, cuja resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura, eles se formam de maneira irregular e pontual na superfície em questão. Essa distribuição gera o aumento da densidade de corrente em alguns pontos provocando superaquecimento capaz de atingir temperaturas superiores ao ponto de fusão do cobre, acima de 1200 °C. Essa temperatura é suficiente para incendiar materiais em suas proximidades (HADZIEFENDIC *et al.*, 2017).

Esse tipo de defeito é especialmente perigoso, visto que as conexões e danos em cabos costumam não ser visíveis em uma instalação, requerendo que a tomada seja desmontada, como na Figura 1. Em alguns casos, esse defeito pode ser ainda mais prejudicial, pois comumente existe uma grande quantidade de emendas e conexões

inacessíveis para inspeção visual ou até mesmo termográfica. A situação é agravada pelo fato de que ensaios de resistência elétrica e de isolamento elétrico podem não ser capazes de identificar essa situação, com grande potencial de causar incêndio, o qual pode ocorrer seja em virtude de calor pontual gerado ou pela decorrência de um curto-circuito por degradação do isolamento elétrico (MARTEL, 2018)

Dispositivos tradicionais de proteção como fusíveis, disjuntores e disjuntores diferenciais residuais (DDRs), em geral, não são capazes de detectar esse tipo de defeito, principalmente quando o arco é limitado pela corrente de carga que é justamente o caso da falta arco tipo série (WU, Y.; SONG; WANG, 2013).

Como pode-se constatar na Figura 2, enquanto a corrente da falta arco paralelo varia de acordo com a impedância de falta, e que em muitos casos tem um baixo valor, a corrente do arco tipo série tende a ser menor, pois a corrente está limitada à corrente de carga. Assim sendo, a corrente da falta arco paralelo pode ter magnitude suficiente para a atuação dos dispositivos de proteção como fusíveis e disjuntores de sobrecorrente. A falta arco paralelo ainda pode ser detectada pelos dispositivos diferenciais residuais (DRs), no caso da falta fase-neutro e fase-terra. Por essa razão, a falta arco série é considerada mais perigosa do que a falta arco paralelo e, por isso, a falta série é possivelmente a principal causa de incêndios de origem elétrica (BABRAUSKAS, 2008).

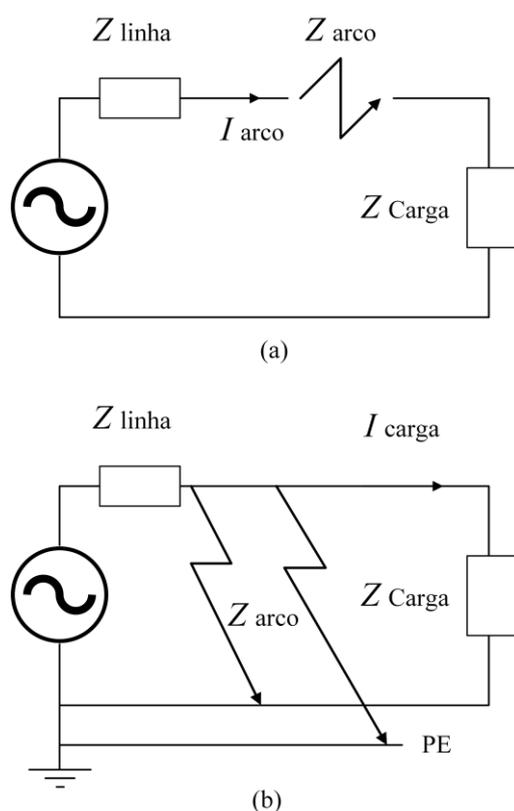
2.2 CARACTERIZAÇÃO DA FALTA TIPO ARCO

De acordo com a norma UL 1699 (UNDERWRITERS LABORATORIES INC., 1999), um arco é definido como uma descarga elétrica luminosa que ocorre em um meio isolante, frequentemente acompanhada da volatilização parcial do eletrodo. Esse fenômeno é parte integrante da instalação elétrica e ocorre durante o funcionamento de algumas

máquinas e dispositivos em condições normais de uso. Alguns tipos de motores, chaves, dentre outros, podem gerar ruídos na rede causados pelos arcos intrínsecos ao seu funcionamento sem provocar danos. Existem, contudo, arcos elétricos causados por defeitos na instalação, aqui chamados de “falta arco”, podendo trazer um grande risco de ocasionar um incêndio (ARTALE *et al.*, 2014; YANG *et al.*, 2016).

Como já mencionado na subseção 2.1, existem dois tipos principais de falta arco. Eles diferem em função do caminho que a corrente de falta percorre, conforme mostrado na Figura 2 (elaborada pelo autor).

Figura 2 - Arco série (a) e arco paralelo (b).



Fonte: elaborado pelo autor.

Além da classificação do arco baseada no percurso da corrente de arco, há também a classificação conforme a origem e o meio de propagação dessa corrente. Desse modo,

é possível classificar o arco de três diferentes formas: arco sem contato por ruptura dielétrica; arco sem contato por trilha carbonizada e arco de contato.

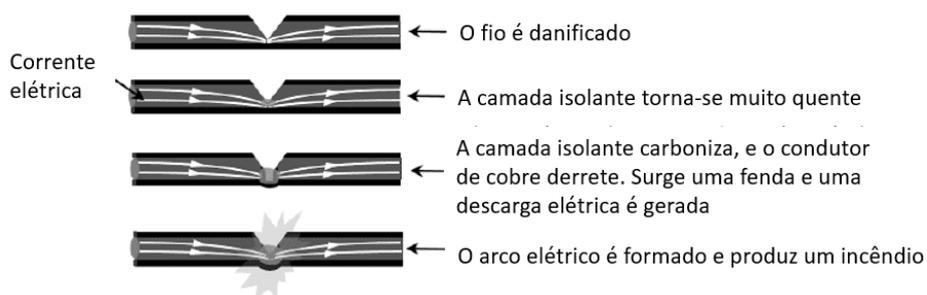
O arco sem contato por ruptura dielétrica é regido pela Lei de Paschen que determina a relação da tensão de ruptura, a pressão e a distância da fenda entre os eletrodos. (RESTREPO, 2007). Tratando-se de instalações elétricas de baixa tensão (BT), esse tipo de arco não é usual. Normalmente, ele ocorre em função da elevação de potencial causada por descargas atmosféricas.

Já o arco sem contato por trilha carbonizada ocorre com frequência em instalações elétricas de BT mal executadas ou sem conservação. Geralmente surgem quando a camada isolante de cabos é danificada. Essa situação pode ainda ser agravada no caso da existência de umidade excessiva e sujeira no local em que o cabo teve sua proteção comprometida. Essa queda no isolamento elétrico pode provocar pequenas descargas e, por consequência, um aquecimento pontual e gradual. Esse processo pode acabar gerando estresse térmico capaz de degradar ainda mais o polímero da camada isolante a ponto de queimá-lo, gerando o chamado caminho carbonizado. Esse caminho passará a ser um caminho alternativo para a corrente, causando mais aquecimento no local. Tal processo, quando desencadeado, pode gerar as condições para a formação de um arco sustentável capaz de causar prejuízos definitivos ao circuito e provocar um curto-circuito. (SHEA, 2007).

O arco de contato, por sua vez, pode ocorrer com o rompimento parcial da parte condutora de um cabo elétrico, também ocasionado por um dano mecânico. O aumento da densidade de corrente poderá criar um aquecimento pontual através do efeito Joule. Esse aquecimento pode provocar a fusão do condutor sem interromper a condução de corrente. Tal mecanismo é chamado de ponte derretida. Na Figura 3 pode-se verificar o

mecanismo de formação do arco em um cabo danificado. Nessas condições o arco irá acontecer, gerando calor através do efeito Joule em decorrência do aumento da resistência de contato em função do estrangulamento da corrente elétrica. Esse tipo de arco pode ocorrer, também, em contatos elétricos com baixa pressão de aperto.

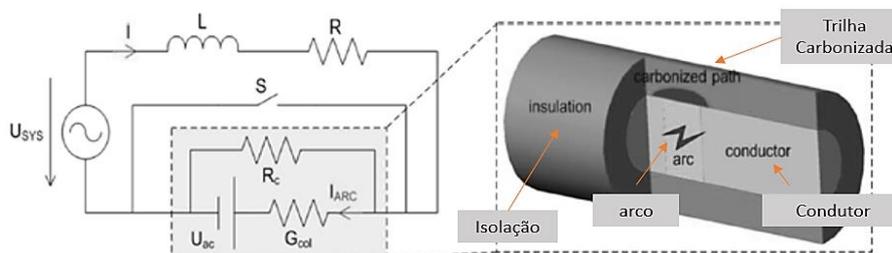
Figura 3 - Arco por caminho carbonizado e ponte derretida em cabo danificado.



Fonte: adaptado de adaptada de (YANG et al., 2016).

Observa-se na Figura 3 que um dano mecânico em um cabo pode gerar simultaneamente os dois tipos de arco, acelerando o processo de comprometimento da integridade do circuito afetado. A Figura 4, adaptada de (MARTEL, 2018), mostra com maiores detalhes a formação do arco em um cabo danificado e um modelo matemático equivalente representado pelo seu circuito elétrico. Este circuito pode reproduzir o comportamento do arco elétrico.(ANDREA *et al.*, 2015).

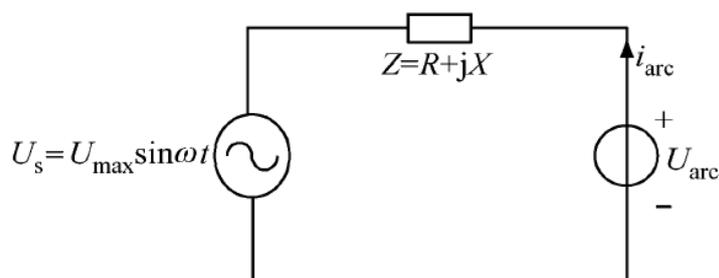
Figura 4 - Circuito elétrico equivalente da falta arco série.



Fonte: adaptado de (MARTEL, 2018).

Existem, ainda, modelos simplificados capazes de reproduzir de maneira satisfatória o evento, conforme o circuito equivalente mostrado na Figura 5, onde U_{arc} representa a tensão do arco gerado.

Figura 5 - Circuito equivalente simplificado de um arco elétrico.



Fonte: adaptado de (WANG et al., 2011).

O modelo matemático representado na Figura 5 foi implementado computacionalmente através do programa Matlab versão R2021b, conforme (1),

$$U_{max} \sin \omega t = R i_{arco} + L \frac{d i_{arco}}{dt} + (20 + 534g) i_{arco}^{0,12} \quad (1)$$

onde:

g : distância do gap;

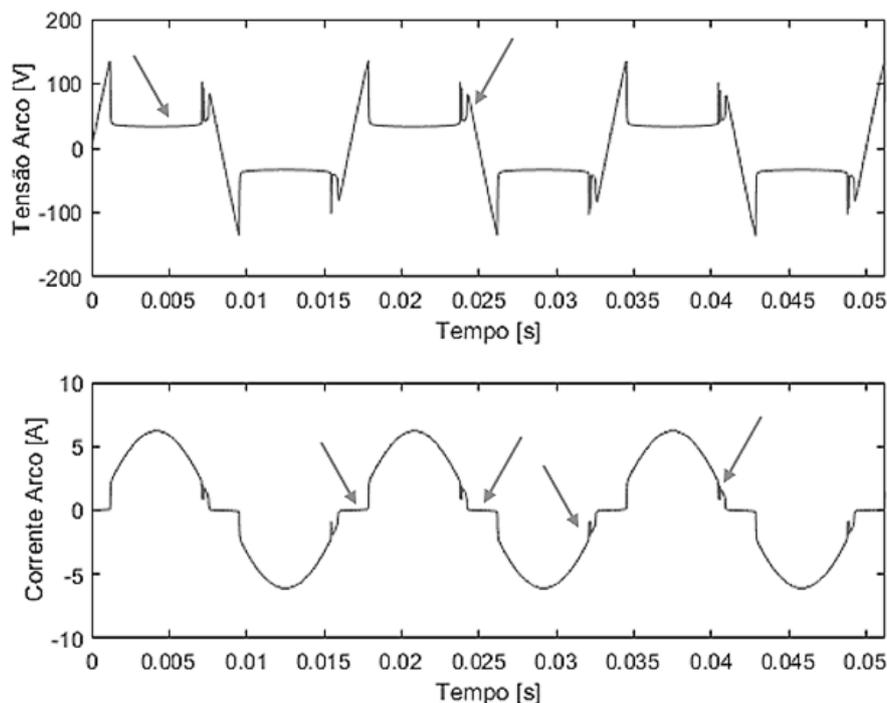
U_{arc} : tensão de arco;

i_{arco} : corrente do arco;

U_{max} = tensão de pico da rede.

O circuito da Figura 5 foi simulado com uma carga RL, $Z=47.5+j1e^{-9}$. A tensão e a corrente de arco gerada podem ser vistas na Figura 6.

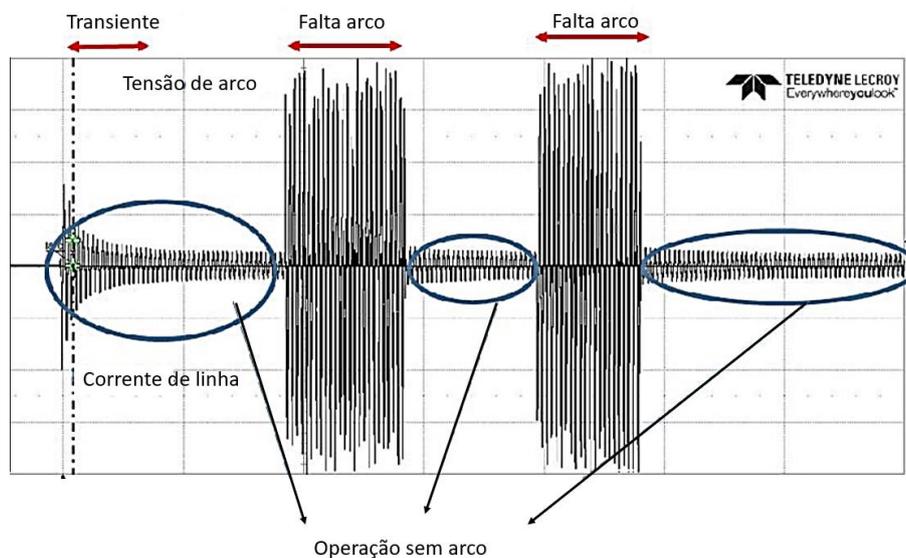
Figura 6 - Simulação falta arco.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os formatos de onda do sinal de corrente e tensão na presença da falta arco correspondem aos observados em ensaios experimentais (ARTALE *et al.*, 2014; HONGKUN; TAO; WENJUN, 2006; KIM *et al.*, 2019; WU; LIU; HUNG, 2017). Os afundamentos na tensão, assim como os chamados “ombros” e picos na transição do eixo zero estão presentes no sinal de corrente. Com o auxílio desses modelos pode-se realizar estudos exploratórios sobre o fenômeno de forma a auxiliar no desenvolvimento de novas soluções. Contudo, os modelos apresentam um comportamento periódico, sendo que na prática esse tipo de falta tem características não estacionárias. (ARTALE *et al.*, 2014), conforme pode-se observar na Figura 7:

Figura 7 - Sinais de corrente e tensão em circuito com falta arco.



Fonte: adaptado de (PATRICK; FRANCESCO, 2020)

2.3 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA DETECÇÃO DA FALTA ARCO

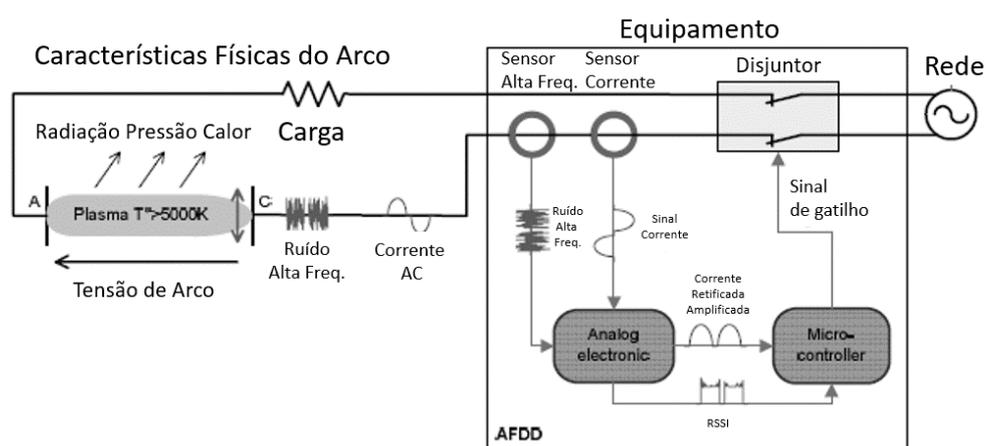
Para a detecção do arco elétrico em instalações industriais e residenciais costumam ser utilizados os sinais elétricos de tensão e corrente de carga, assim como os sinais de rádio frequência gerados pelo fenômeno, os quais podem variar de 10 KHz até 1GHz (ARTALE *et al.*, 2014; ASFANI, 2016). O tratamento e a análise desses sinais podem ser feitos através de uma variedade de metodologias, explorando a forma de onda, a taxa de variação da corrente e o nível de energia do sinal.

Estão disponíveis no mercado, há alguns anos, dispositivos capazes de proteger a instalação, tanto do arco série, quanto do arco paralelo. Trata-se dos dispositivos chamados de *Arc Fault Detection and Interrupter* (AFDI) (LEE; TROTTA; KING, 2000). Embora esse tipo de dispositivo seja obrigatório em alguns países como nos Estados Unidos, globalmente ainda não são largamente utilizados. Esse fato pode estar relacionado com a falta de confiabilidade desses aparatos. Para contornar essa situação,

uma série de pesquisas vem sendo conduzidas para desenvolver novos métodos de detecção de arco, a fim de tornar o sistema mais robusto e evitar desligamentos desnecessários (BAO; JIANG; LIU, 2019; LI *et al.*, 2009; SHEA, J.; CARRODUS, 2011; YANG *et al.*, 2016).

Os dispositivos AFDIs atualmente utilizam os sinais de corrente de carga em baixa frequência (até 1 kHz) e alta frequência (até 23 MHz). A associação da análise desses sinais busca diferenciar os ruídos gerados por algumas cargas do ruído gerado pelo arco série. A Figura 8 mostra o esquema de uma dispositivos AFDI comercial.

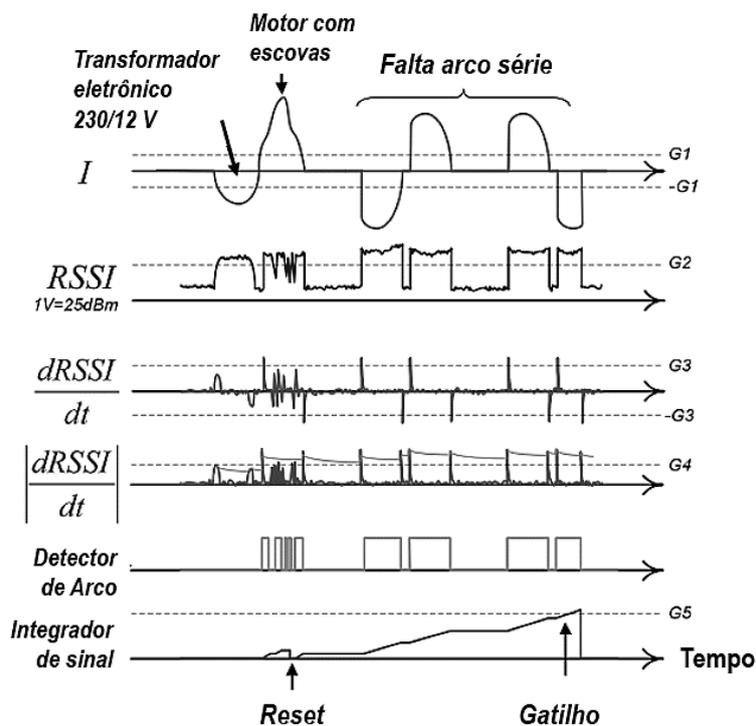
Figura 8 - Esquema de detecção dos dispositivos AFDI (Siemens).



Fonte: adaptado de (SIEMENS, 2016).

A metodologia completa utilizada pelo fabricante é confidencial, contudo, alguns detalhes sobre o processamento de sinais utilizados são apresentados na Figura 9:

Figura 9 - Princípios de funcionamento do AFDI (Siemens).



Fonte: adaptada de (SIEMENS, 2016).

Pode-se observar na Figura 9 que o gatilho para abertura do circuito está baseado no valor da variação do sinal RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) que representa a potência do ruído de alta frequência (23 MHz). Essa, associada ao sinal de corrente de carga visa distinguir a operação com arco, mesmo na presença de cargas ruidosas. Verifica-se que a metodologia utilizada nesse dispositivo, lançado em 2012, utiliza a forma de onda desses sinais no domínio do tempo no seu processamento.

Uma pesquisa sobre as patentes registradas sobre o tema mostra que a maioria dos equipamentos utilizam sinais de alta frequência e análises no domínio do tempo para a detecção (ARTALE *et al.*, 2017).

Atualmente, contudo, com os avanços tecnológicos, estão disponíveis no mercado controladores com alto poder de processamento, tamanho reduzido e baixo custo. Esse

fato permite a construção de dispositivos baseados em metodologias mais sofisticadas, no domínio da frequência, por exemplo.

2.4 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DA FALTA ARCO TIPO SÉRIE

A correta detecção da falta arco série não é uma tarefa trivial, tendo em vista o mascaramento do sinal causado por equipamentos presentes na rede elétrica, como motores com escovas, chaves, entre outros, que também geram arcos elétricos no seu funcionamento. Esse mascaramento é ainda mais problemático para arcos do tipo série, que sofrem maior influência da corrente de carga (ARTALE *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2009). Análises no domínio frequência através da utilização da transformada de Fourier (HADZIEFENDIC; KOSTIC; RADAKOVIC, 2009), transformada de Fourier de Curto Tempo (YANG *et al.*, 2016), transformada Chirp Zeta (ARTALE *et al.*, 2017) vem sendo utilizadas para a extração de características para detecção da falta arco.

Com objetivos de aprimorar a detecção, a transformada wavelet (TW) passou a ser utilizada para este fim devido às características não estacionárias do fenômeno (LAZKANO *et al.*, 2004; LU *et al.*, 2017; YI *et al.*, 2009; ZHI-TING; LU; DI, 2018).

2.4.1 Transformada Wavelet (TW)

As perturbações causadas pela falta arco ocorrem de maneira aleatória e com características randômicas, trata-se, portanto, de um sinal não estacionário. Para sinais com este tipo de características a transformada de Fourier pode não apresentar resultados satisfatórios. Por outro lado, a TW, que pode ser enxergada como uma evolução da TF, é capaz de analisar um sinal não-estacionário com resolução espectral superior, em diferentes faixas de frequência (SIFUZZAMAN; ISLAM; ALI, 2009).

A TW é uma ferramenta que vem sendo amplamente utilizada no Sistema Elétrico de Potência para a detecção de distúrbios como elevação e afundamentos de tensão, interrupções, dentre outros fenômenos não estacionários, incluindo a falta arco. Além de permitir a análise de eventos não estacionários com alto grau de resolução, essa transformada permite a localização destes distúrbios no tempo (ANDRADE, 2017).

A TW é definida por (5).

$$TW_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int x(t) \psi\left(\frac{t - \tau}{\alpha}\right) dt \quad (5)$$

Essa equação se refere à transformada wavelet contínua, aonde $\psi(t)$ é a função chamada mãe, α é o fator de alongamento e τ fator de deslocamento.

A função mãe, ou família da wavelet, é determinada pelas características do sinal e sua aplicação. Existem uma grande variedade de famílias, dentre elas pode-se citar: Haar, Symlets, Daubechies, Morlet, Gaussianas complexas, Meyer, Coiflets, Biorthogonais, Biorthogonais reversas, Gaussianas, Chapéu Mexicano, Shannon, dentre outras.

O sinal original, contínuo, $X(t)$ é discretizado tornando-se $X(n)$, $n = 1, 2, 3 \dots$. Se o sinal original é definido por A_s , então depois da TW é descrito por (6),

$$WT_x(a_0^j, k_{\tau_0}) = \int x(t) \psi^*(t) dt \quad (6)$$

sendo $j = 0, 1, 2, 3, \dots, k \in \mathbb{Z}$.

Em (7) o sinal A_n é decomposto em um sinal $A_{(j+1)}$ composto por vários sinais aproximados e vários níveis de detalhes $D_{(j+1)}$. O sinal aproximado $A_{(j+1)}$ é o

resultado de um filtro passa baixa em A_j e os detalhes $D_{(j+1)}$ são obtidos através de um filtro passa altas aplicado no sinal.

$$A_n = A_1 + D_1 = A_2 + D_1 + D_2 = \dots \quad (7)$$

A decomposição é feita por faixas de frequência, conforme (8), que são estabelecidas conforme o número de níveis de detalhes escolhido e a frequência de amostragem utilizada,

$$\begin{cases} D_j(k): [2^{-(j+1)}f_a, 2^{-j}f_a] \\ A_j(k): [0, 2^{-(j+1)}f_a] \end{cases} \quad (8)$$

sendo $j=0,1,2,3,\dots,m$.

Depois do processo de decomposição, o sinal discreto $X(n)$ pode ser representado por (9).

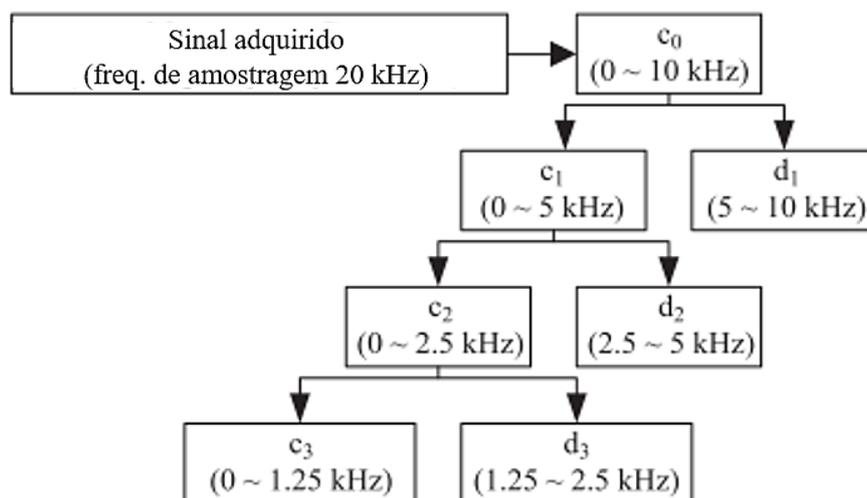
$$X(n) = A_n + D_1 = A_2 + D_1 + D_2 + \dots + D_n \quad (9)$$

Em (9) o sinal original é representado pelo somatório de uma série de sinais correspondentes ao sinal aproximado A_n e os respectivos sinais de detalhamento D_n . O número de níveis da decomposição está relacionado à precisão da análise no domínio tempo-frequência do sinal, pois quanto maior o nível de decomposição, maior será a resolução espectral disponível.

Na prática, a TW é utilizada como um banco de filtros passa alta e passa baixa (MALLAT, 2009), implementados em cascata. Essa técnica é bastante eficiente para a divisão do sinal em subfaixas de frequência preservando a resolução, tanto dos sinais de alta quanto dos sinais em baixa frequência. A Figura 10 ilustra o processo de

decomposição da TW. Cada etapa de decomposição compreende a aplicação de um filtro passa altas e um filtro passa baixas.

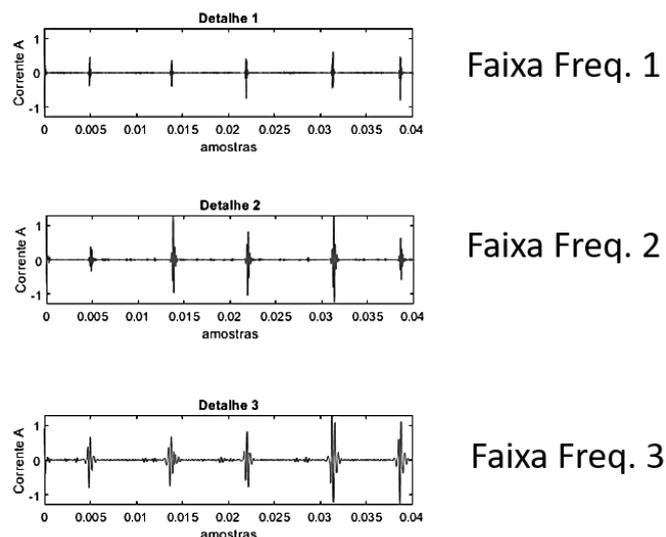
Figura 10 - Decomposição em múltiplas resoluções através da (TW)



Fonte: adaptado de (WU; LIU; HUNG, 2017).

Para o caso da decomposição de um sinal de corrente até o nível 3 pode-se observar que o sinal original é decomposto em 3 sinais de “detalhes” e 3 sinais “aproximados”, em diferentes faixas de frequência. O sinal de aproximação do nível anterior dará origem ao sinal de detalhe do nível seguinte. A Figura 11 (elaborado pelo próprio autor) mostra os sinais de detalhe da decomposição, sendo o primeiro o detalhe da faixa mais alta de frequência, $d1$, e o quinto, $d3$, o detalhe da faixa de frequência mais baixa. No caso de um sinal discreto, as faixas de frequências são definidas pela frequência de amostragem f_a .

Figura 11 - Sinais da decomposição TW em 3 níveis.



Fonte: elaborada pelo autor.

A decomposição da TW da família Daubchies é utilizada em (ZHI-TING; LU; DI, 2018). O trabalho demonstra que existe uma alteração no nível de energia nos sinais de detalhe da decomposição durante a ocorrência do arco elétrico. Segundo os resultados apresentados, há um aumento de 26% na energia do detalhe $d5$ nessas condições para as 3 cargas testadas.

Em (YI et al., 2009), foi utilizado o princípio da detecção de singularidade utilizando o expoente de Lipschitz para detecção de variações bruscas do módulo do valor máximo dos coeficientes da TW. As singularidades aparecem em função da forma característica da forma de onda da corrente, nos chamados “ombros” quando há a passagem pelo zero. A partir desse parâmetro, foi estabelecido um valor de gatilho que pode indicar a presença de um arco série. Para o experimento foi utilizado apenas dois tipos de carga: máquina de indução e forno elétrico. A metodologia implica no monitoramento em tempo real dos parâmetros elétricos para conseguir detectar o surgimento de uma falta arco.

Em (LI et al., 2009) a TW foi associada à TF para a detecção da condição de operação com arco elétrico. Através da extração do percentual da corrente de terceira harmônica e do módulo do sinal do detalhe dI , alta frequência, foi possível detectar o arco elétrico para as cargas consideradas. Os autores ressaltam que a metodologia necessita mais estudos para comprovar sua validade.

Existem ainda técnicas baseadas em outras transformadas. Em (CHEN et al., 2015), são apresentados resultados promissores utilizando a transformada Hilbert-Huang, que consiste em duas fases: o modo de decomposição empírica (EMD) e a análise espectral de Hilbert (HSA). Essa técnica também se destina a fenômenos não estacionários. Contudo, diferentemente da TW, não existe a necessidade da definição do tipo da “família mãe” para a decomposição. As funções bases derivam do próprio sinal e tem amplitude e frequência variáveis.

2.5 MODELOS INTELIGENTES NA DETECÇÃO DA FALTA ARCO

Com base na revisão da literatura observa-se que a utilização de modelos inteligentes baseados em aprendizagem de máquinas (AM) vem sendo a cada dia mais utilizados para a identificação da falta arco. Modelos inteligentes, como classificadores binários, tem o objetivo de separar duas classes diferentes, no caso específico deste estudo, classificar como falta arco, ou operação normal.

Em (WANG, F. ZHANG; S. ZHANG, 2018) utilizou-se a teoria da representação esparsa para composição de base de treino para redes neurais artificiais com objetivo de detecção do arco elétrico.

Em (LU et al., 2017) é utilizada a TW em conjunto com *singular value Decomposition* (SVD). A combinação desses métodos reduz o número de informações

redundantes e ajuda a distinguir a operação normal da condição com arco através dos parâmetros característicos K . O estudo foi realizado com 11 diferentes cargas que mostraram variação clara nos parâmetros na operação com arco quando comparada a operação normal.

Uma metodologia mais complexa, combinando uma série de transformadas para análise espectral também é apresentada em (VU *et al.*, 2019). Através da implementação de uma rede neural artificial foi criado um algoritmo para detecção do arco com base em 21 transformadas e 10 preditores associados. A combinação mais efetiva encontrada foi a associação da transformada de Fourier, transformada Chirp Zeta e transformada Wavelet.

Através da transformada de Fourier de Tempo Curto utilizando o processamento da energia do sinal de alta frequência e a variação do sinal de corrente em (YANG, K. *et al.*, 2016) foi implementado um algoritmo baseado em máquina de vetores de suporte com mínimos quadrados ponderados, cuja sigla em inglês é *WLS-SVM*.

2.5.1 Conceitos Sobre Máquinas De Aprendizagem

As técnicas de aprendizagem de máquina (AM) empregam um princípio de inferência denominado indução. Pode-se dividir o aprendizado indutivo em duas principais categorias: o aprendizado supervisionado e não-supervisionado (LORENA; CARVALHO, 2007).

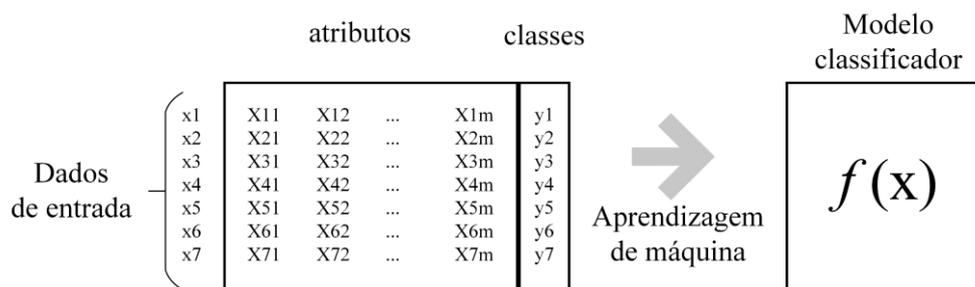
No caso do aprendizado supervisionado existe a figura de um professor externo, que traduz o conhecimento do ambiente através de um conjunto de amostras, entradas e saídas desejadas (HAYKIN, 2009).

Já o aprendizado não-supervisionado não existe amostras rotuladas. O algoritmo aprende e representa as entradas segundo uma medida de qualidade. Essa técnica normalmente é utilizada para encontrar padrões e tendências que possibilitem uma melhor compreensão dos dados (WLODARCZAK, 2019).

Para o caso de interesse deste trabalho aplica-se a aprendizagem supervisionada, onde a partir de um padrão conhecido, são rotulados os dados de entrada para que a máquina seja capaz de identificar um padrão e classificar entradas não conhecidas conforme as classes aprendidas através de atributos chamados preditores.

Na Figura 12 é possível observar a representação de um fluxo para elaboração de um modelo classificador baseado em aprendizagem de máquina.

Figura 12 - Modelo classificador baseado em AM



Fonte: adaptado de (LORENA; CARVALHO, 2007).

2.5.2 Máquina De Vetores De Suporte (SVM)

O algoritmo SVM consiste em uma metodologia de aprendizagem de máquina supervisionada que foi criada inicialmente para classificação binária, mas também pode ser utilizada para regressões e “clusterização” (HAYKIN, 1999).

Esta técnica é baseada na definição de um hiperplano de separação entre classes. Considerando um problema de classificação binária com classes linearmente separáveis

ω_1 e ω_2 para um conjunto de treinamento x_i ($i = 1, \dots, M$) a função de decisão pode ser definida por (10):

$$D(x) = w^T x + b \quad (10)$$

onde x (padrão a ser classificado) w (peso) são vetores m -dimensionais e o b refere-se a um termo independente. Os rótulos (1 e -1) são representados por y_i , cujo critério de classificação é escrito conforme (11):

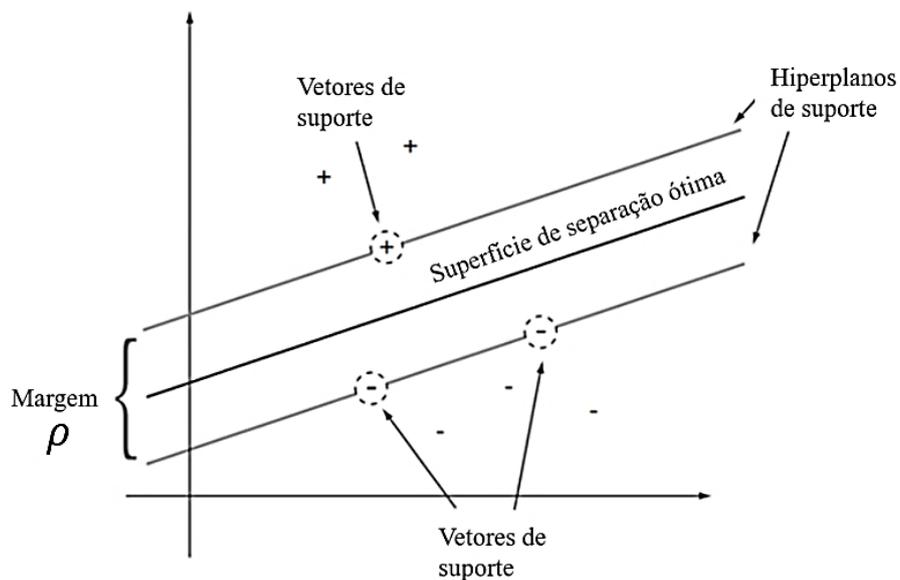
$$w^T x + b \begin{cases} \geq 1 \text{ para } y_i = 1 \\ \leq -1 \text{ para } y_i = -1 \end{cases} \quad (11)$$

Com base no critério de classificação pode-se escrever a equação do hiperplano de separação conforme (12):

$$D(x) = w^T x + b = c \text{ para } -1 < c < 1 \quad (12)$$

A figura 13, adaptado de (HAMEL, 2009), representa o hiperplano de separação entre duas classes, (-1 e +1):

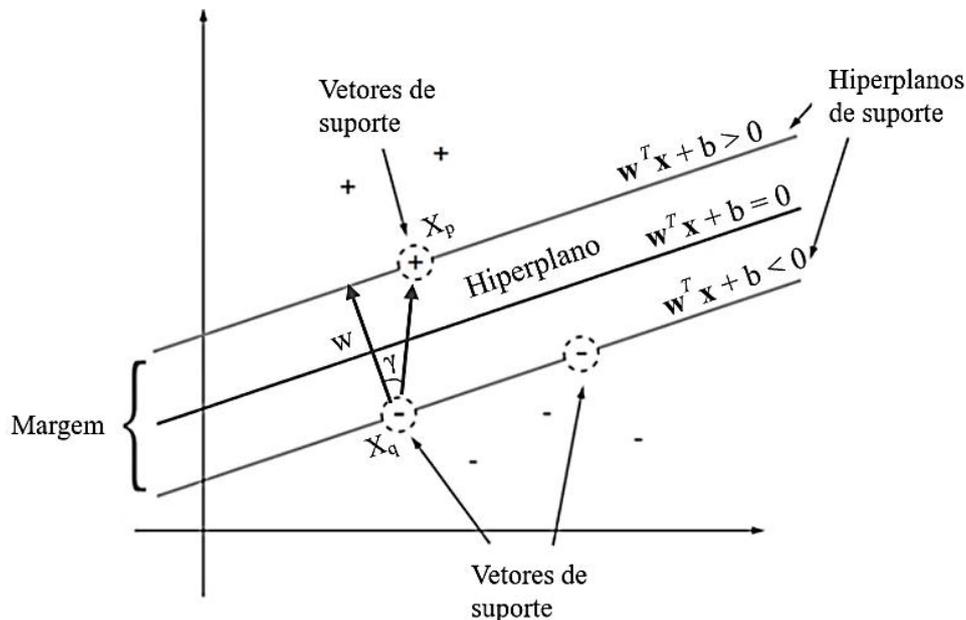
Figura 13 - Superfície de separação (hiperplano) dentre duas classes.



Fonte: adaptado de (HAMEL, 2009).

A figura 14 mostra três hiperplanos com, conforme (12), quando $c = 0$, chamado de hiperplano de separação ou superfície de decisão, $c = 1$ e $c = -1$ chamado de hiperplano de suporte. As amostras localizadas nestas superfícies de suporte são chamadas vetores de suporte. A distância entre os hiperplanos de suporte é denominada como "margem" e representada na figura (14) adaptado de (HAMEL, 2009), por ρ .

Figura 14 - Superfície de separação (hiperplano) dentre duas classes.



Fonte: adaptado de (HAMEL, 2009).

Essa distância pode ser calculada por (13):

$$\begin{aligned}
 \rho &= \|x_p - x_q\| \cos \gamma \\
 &= \frac{w \cdot (x_p - x_q)}{\|w\|} \\
 &= \frac{(b + 1)(b - 1)}{\|w\|} \\
 &= \frac{2}{\|w\|}
 \end{aligned} \tag{13}$$

A maximização da margem irá melhorar a capacidade de generalização, e para isso é necessário maximizar $\frac{2}{\|w\|}$. Pode-se considerar esse problema de maximização como um problema de minimização de $\|w\|$ que pode ser reescrito por $\frac{\|w\|^2}{2}$. Para este problema de otimização é apresentada a seguinte formulação (14):

$$\begin{aligned} &\text{minimizar } \frac{\|w\|^2}{2} \\ &\text{sujeito à } y_i(w^T x_i + b) \geq 1, 1 \leq i \leq m. \end{aligned} \quad (14)$$

A introdução da restrição é para que não haja amostra na região de separação das classes que pode ser resolvida pela técnica de multiplicadores de Lagrange (α), obtendo-se a nova função objetivo (15):

$$Q(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^M \alpha_i y_i (w^T x_i + b) + \sum_{i=1}^M \alpha_i \quad (15)$$

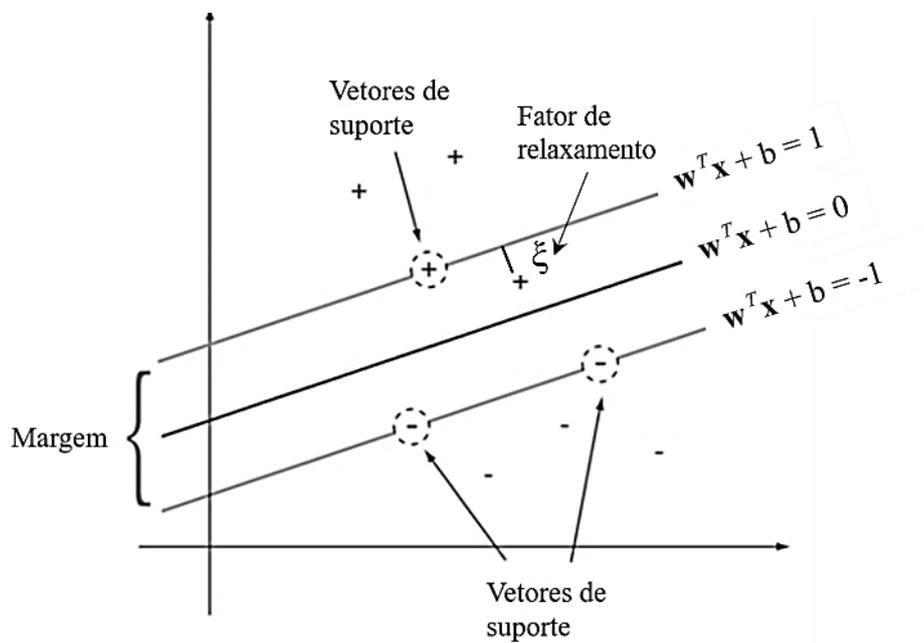
Após uma série de relações matemáticas que podem ser vistas em (HAMEL, 2009), é obtida a chamada forma dual para a função decisão (16):

$$D(x) = \sum_{i \in S} \alpha_i y_i x_i^T x + b \quad (16)$$

Segundo (HAMEL, 2009) esta formulação permite facilmente que um classificador linear baseado em SMV seja estendido para um classificador não linear.

A opção de otimização utilizada para a maximização da margem considerou amostras linearmente separáveis na prática é pouco provável de ocorrer. O problema pode ser tratado de forma idêntica para amostras não separáveis linearmente, mas com a inclusão de um fator de penalidade para amostras que de treinamento que estejam dentro da margem máxima. Este fator é chamado de variável de folga (ξ_i) para cada ponto, conforme mostrado na figura 15:

Figura 15 - Superfície de separação (hiperplano) dentre duas classes.



Fonte: adaptado de (HAMEL, 2009).

Esta abordagem introduz o conceito conhecido como suavização de margens da SVM. Essa técnica permite a ocorrência de algumas classificações erradas, quando o ξ_1 é maior que 1. O problema agora deve buscar a minimização destes erros na nova formulação da função objetivo (17):

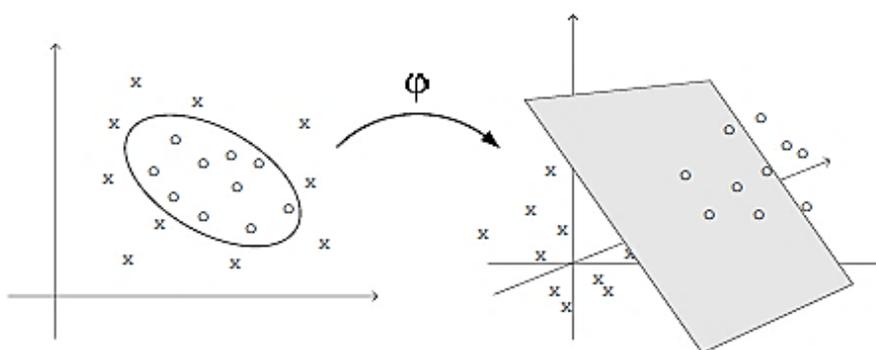
$$Q(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - C \sum_{i=1}^M \xi_i \quad (17)$$

O parâmetro C (parâmetro de margem) é um parâmetro a ser escolhido, referente à penalização associada ao erro cometido. A solução do problema é resolvida de forma

análoga à anterior e sua função decisão é idêntica à função de margem rígida (16) contudo, o valor de α_i não pode exceder C (Abe, 2005).

Existem classes com superfícies de separação mais complexas, não linearmente separáveis. Segundo (Abe, 2005) Quando os dados não forem linearmente separáveis o modelo classificador obtido pode ter baixo poder de generalização, mesmo considerando o hiperplano ótimo. Para melhorar o desempenho para situações com fronteiras mais complexas o espaço original é mapeado em um espaço de dimensão mais alta chamado de espaço de características, como mostrado na figura 16, adaptado de (PRESS et al., 2007) :

Figura 16 - Truque do kernel, adaptado de (PRESS et al., 2007).



Fonte: adaptado de (PRESS et al., 2007).

Essa técnica é baseada na função kernel (núcleo do produto interno). Este recurso é chamado de mapeamento do kernel ou ainda truque do kernel. De acordo como o núcleo deste produto interno é gerado, é possível desenvolver diferentes máquinas de aprendizagem, com diferentes superfícies de decisão não lineares. Existem uma série de funções de mapeamento que podem ser utilizadas, como função linear, polinomial, sigmóide e de base radial.

2.5.3 Métricas de Desempenho

Uma das maneiras mais intuitivas de avaliar o desempenho de um modelo inteligente é a quantidade de erros que ele comete ao classificar determinado conjunto de dados. Podemos caracterizar, também o seu desempenho pela quantidade de acertos, cujo nome do inglês é *accuracy* (*ACC*), que consiste no número de predições corretas pelo total de observações (HAMEL, 2009).

$$Accuracy (ACC) = \frac{\text{número classificações corretas}}{\text{número total de observações}} \quad (17)$$

Esse percentual costuma ser apresentado através da chamada matriz de confusão binária, conforme é mostrado na Tabela 2. Essa matriz apresenta o número de verdadeiros positivos (VP) e verdadeiros negativos (VN). Além dos acertos, a matriz também apresenta os erros, do tipo I falso negativo (FN) e do tipo II falso positivo (FP).

Tabela 1 - Matriz de Confusão.

Observado	Previsto	
	+1	-1
+1	Verdadeiro positivos (VP)	Falso negativo (FN)
-1	Falso positivos (FP)	Verdadeiro negativo (VN)

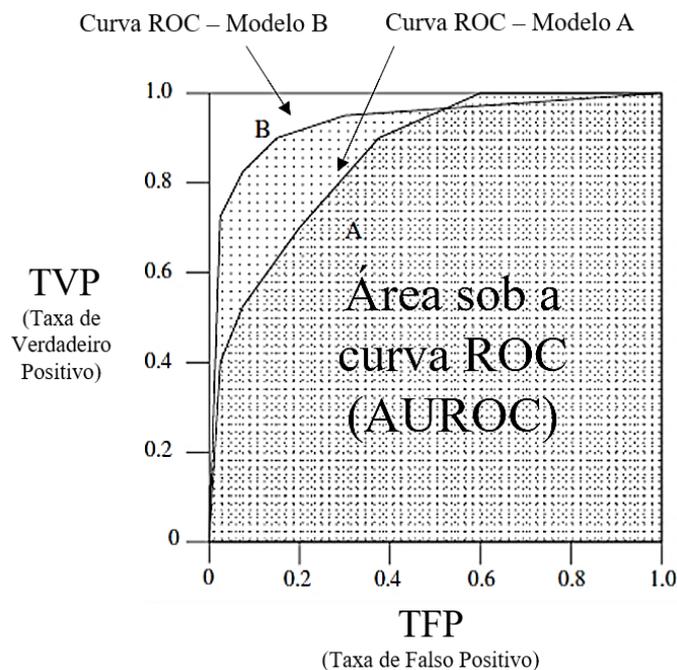
Fonte: adaptado de (HAMEL, 2009).

O valor de *accuracy* (*ACC*) é obtido através da razão entre o somatório dos VP e VN sobre o total de amostras da validação. Esse parâmetro é apresentado em valores percentuais.

O valor de ACC pode ser insuficiente para avaliar o comportamento de um modelo inteligente e por isso existem uma série de outros parâmetros de análise. Dentre eles existe a chamada curva *ROC (Receiver Operating Characteristics)*, atualmente muito aplicada à área de modelos inteligentes. Este parâmetro pode ser muito útil em situações em que existem um distribuição desigual de custo de erro, (FAWCETT, 2006).

A coordenada x e y da qual é traçada essa curva está associada à taxa de verdadeiros positivos e de falsos positivos. A área abaixo dessa curva, chamada de AUROC, do inglês *Area Under the Receiver Operating Characteristics*, mostrada na Figura 17, fornece a probabilidade de correta classificação quando a classe da amostra é verdadeira, conforme as validações executadas. Esse parâmetro é muito utilizado para bases de dados não equilibradas, ou seja, que não possuem a mesma quantidade de medidas para cada classe. A área abaixo da curva varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho (YANG, S.; BERDINE, 2017).

Figura 17 - Curva ROC



Fonte: adaptado de (FAWCETT, 2006).

A Taxa de Verdadeiro Positivo, TVP, também é chamada em inglês de TPR – *True Positive Rate, Recall ou Sensitivity* e é calculada conforme (18).

$$TVP = \frac{VP}{VP + FP} \quad (18)$$

A Taxa de Falso Positivo, TFP, também conhecida em inglês como FPR – *False Positive Rate*, é calculada da seguinte forma segundo (19).

$$FVP = 1 - \frac{FP}{VP + FP} \quad (19)$$

Quanto mais próximo de um o valor da área do gráfico, melhor o classificador e quanto mais próximo de zero, pior o classificador. Por outro lado, um valor próximo a 0.5 significa que o classificador não é capaz de distinguir entre as classes. Esse é o pior resultado possível.

Tabela 2 - Interpretação da AUROC.

AUC = 0,5	Sem capacidade de classificação, resposta randômica
$0,6 \geq \text{AUC} > 0,5$	Baixa capacidade de classificação
$0,7 \geq \text{AUC} > 0,6$	Capacidade de classificação aceitável
$0,8 \geq \text{AUC} > 0,7$	Ótima capacidade de classificação
AUC > 0,9	Excelente capacidade de classificação

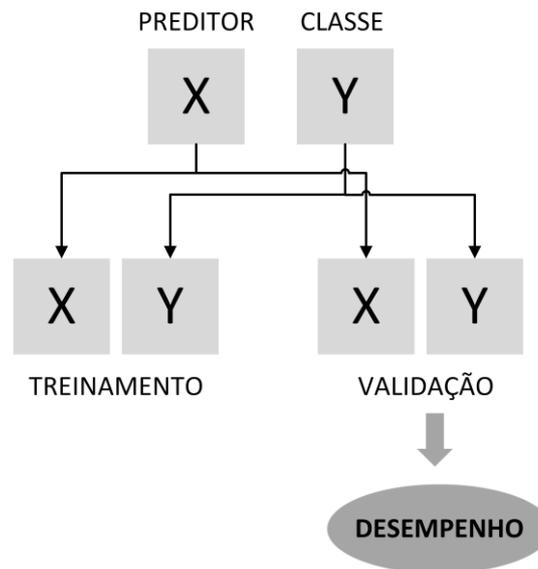
Fonte: adaptado de (YANG, S.; BERDINE, 2017)

2.5.4 Construção e Validação De Modelos Inteligentes

Modelos classificadores podem ser construídos e testados de diferentes formas. As formas mais comuns são as chamadas *Holdout* e *Cross Validation* (AWWALU, 2019).

Há ainda o método chamado resubstituição consiste na construção e validação do modelo na mesma base de dados. Os dados de treinamento e de testes são idênticos. Por isso também é chamado de estimação aparente. Sabe-se que este método é otimista, pois bons resultados nos testes podem não se entender para testes com dados externos. Esse efeito (BERRAR, 2018) também é chamado de *overffiting*.

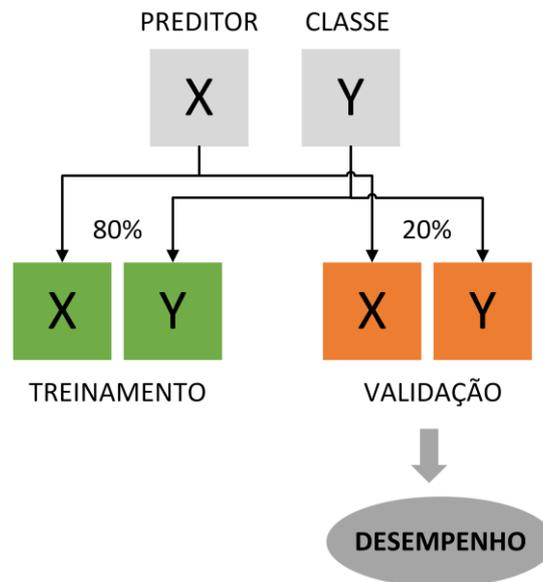
Esse método é representado através da Figura 18.

Figura 18 - Método com resubstituição.

Fonte: elaborado pelo autor.

Uma maneira de evitar o *overfitting* é excluir uma parcela dos dados na etapa de treinamento para realização de uma validação com dados que o algoritmo não teve acesso, avaliando dessa maneira a capacidade de generalização do classificador. Essa metodologia também é conhecida, do inglês, *holdout*. O percentual a ser reservado pode variar de acordo com o volume de informação disponível, sendo que o percentual de 20% costuma ser adotado. Nesse caso, 80% dos dados são utilizados na etapa de treinamento e 20% na etapa de validação, conforme mostra o exemplo da Figura 19. Pode-se observar que somente parte dos dados são utilizados na etapa de treinamento. A validação, contudo, tende a ser mais fidedigna podendo expor eventual efeito de *overfitting*.

Figura 19 - Método *holdout*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

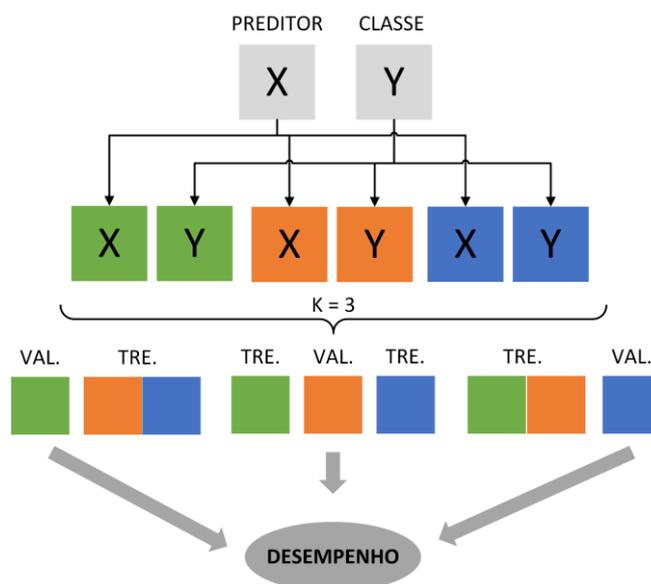
Ainda que haja um ganho na confiabilidade na avaliação de desempenho, cabe considerar que a redução no número de dados na etapa de treinamento pode reduzir a qualidade do modelo.

Uma maneira de utilizar todos do volume de dados disponíveis na etapa de treinamento, assim como o método da ressubstituição, e ainda sim avaliar de forma mais realista o modelo é a utilização da chamada validação cruzado. Esse método, chamado em inglês de *cross-validation k-fold*. Trata-se de um dos métodos mais utilizados para estimar o erro real do modelo (BERRAR, 2018). Essa técnica tende a fornecer estimativas mais acertadas sobre o poder de generalização para bases de dados pequenas (MALEKI *et al.*, 2020).

O método consiste na subdivisão em grupos, assim como na validação *holdout*, porém realiza uma série de etapas de treinamento e validação de maneira a permitir que

todo o grupo participe das duas etapas. A Figura 20 ilustra a dinâmica desse tipo de validação apresentando como exemplo a validação com a segmentação dos dados em 3 grupos distintos.

Figura 20 - Método de validação cruzada (CV) *k-fold*.



Fonte: elaborado pelo autor.

O método consiste na divisão dos dados em “ K ” grupos de tamanhos equivalentes onde uma parte é reservada para teste e a outra para validação. Esse processo é repetido até que todos os grupos tenham sido utilizados na etapa de treinamento e na etapa de validação. A *accuracy* é calculada como a média de cada um dos resultados. Por esse motivo é um método que traz resultados mais realistas quanto a capacidade de predição do modelo, mesmo para dados de entrada desbalanceados com número de classes diferentes na amostra (BARANAUSKAS; MONARD, 2000).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

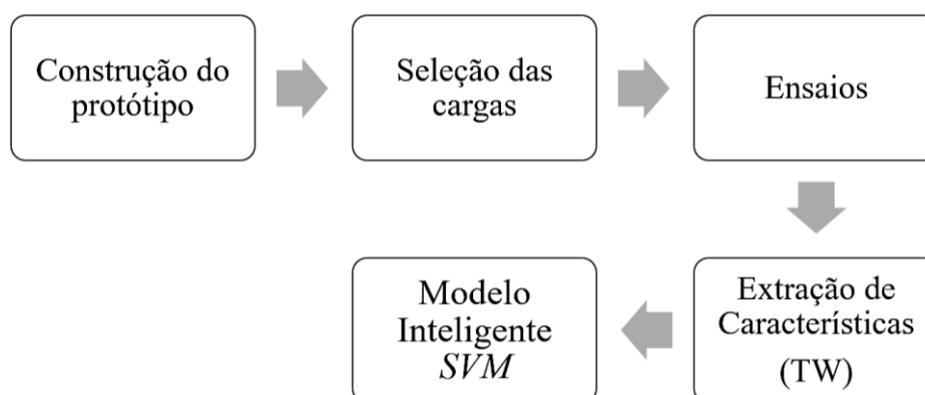
Este capítulo apresentou, de forma ampla, conceitos teóricos e pesquisas que foram utilizadas como referência na identificação do problema, estabelecimento dos objetivos e desenvolvimento da metodologia proposta. Tendo em vista a variedade de conceitos teóricos utilizados no trabalho, o capítulo não tem como objetivo um aprofundamento dos tópicos teóricos citados. Para isso estão sendo indicadas referências bibliográficas pertinentes. No próximo capítulo, a metodologia proposta para a detecção da falta arco série será apresentada.

3 METODOLOGIA

De forma a avaliar as características do arco elétrico tipo série, foi construído um aparato (protótipo) para gerar tal transitório. Esse dispositivo foi utilizado para a realização de ensaio, e cargas com diferentes características e potências. Os sinais de corrente de carga foram coletados e decompostos através da transformada wavelet (TW). Os sinais dos detalhes das diferentes bandas de frequência foram avaliados buscando a identificação de padrões na forma de onda que pudessem indicar a presença do arco elétrico. Essas informações foram utilizadas como preditores em um modelo classificador binário baseado na metodologia de máquinas de vetores de suporte (SVM).

As principais etapas do desenvolvimento da metodologia são apresentadas na Figura 21, identificando suas respectivas subseções, as quais serão detalhadas a seguir

Figura 21 - Fluxograma da metodologia desenvolvida.



Fonte: elaborado pelo autor.

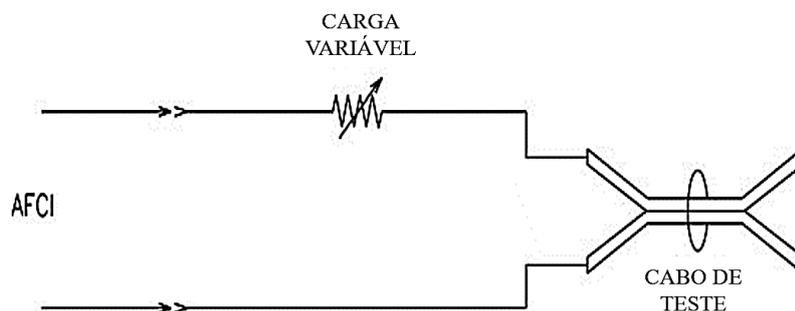
3.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO (GERADOR DE FALTA ARCO SÉRIE)

A detecção precoce de arcos elétricos e corte na alimentação do circuito pode evitar incêndios de forma substancial. Como já reportado, existem no mercado uma série de dispositivos com esse objetivo os chamados *Arc-Fault Circuits and Interrupters*

(AFCIs). Para que fosse possível comparar o desempenho dos dispositivos de diferentes fabricantes a norma UL 1699 (UL, 1999) apresenta uma série de ensaios padronizados para avaliação do desempenho dos chamados AFCIs destinados à utilização em residências. O conjunto de ensaios contempla procedimentos como a avaliação do tempo de interrupção do circuito com a falta arco; teste de inflamabilidade de materiais próximos à região de ocorrência da falta e teste de inibição de atuação através do mascaramento do sinal utilizando cargas ruidosas. Para cada um desses testes é apresentado o aparato padrão para simular cada situação. Neste contexto, são aqui discutidos os conceitos teóricos pertinentes e o respectivo viés experimental, especificando os procedimentos, componentes e materiais utilizados juntos aos experimentos realizados.

Para o teste de atuação do AFCIs, são utilizados dois dispositivos. O primeiro consiste em um cabo bipolar que recebe um corte na isolação e a aplicação de alta tensão, 7 kV, fazendo com que a camada de isolamento elétrico aqueça até o ponto de carbonização, passando a conduzir a corrente elétrica entre os fios. Essa circunstância é chamada de falta arco por caminho carbonizado. O esquema para esse tipo de ensaio é mostrado na Figura 22, adaptado de (UL, 1999).

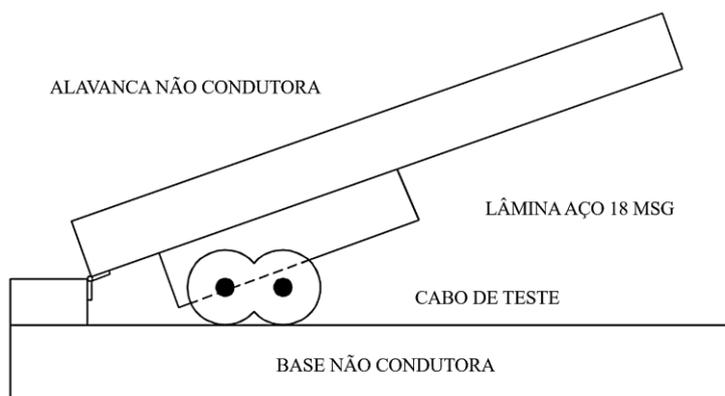
Figura 22 - Teste arco por caminho carbonizado (UL 1699).



Fonte: adaptado de (UL, 1999).

O outro aparato usado para teste de atuação consiste em uma guilhotina que provoca um dano na isolação suficiente para gerar um ponto de contato sólido em um dos fios e apenas um caminho com baixa pressão de contato, conforme ilustrado na Figura 23, adaptado de (UL, 1999).

Figura 23 - Teste falta arco ponto de contato.



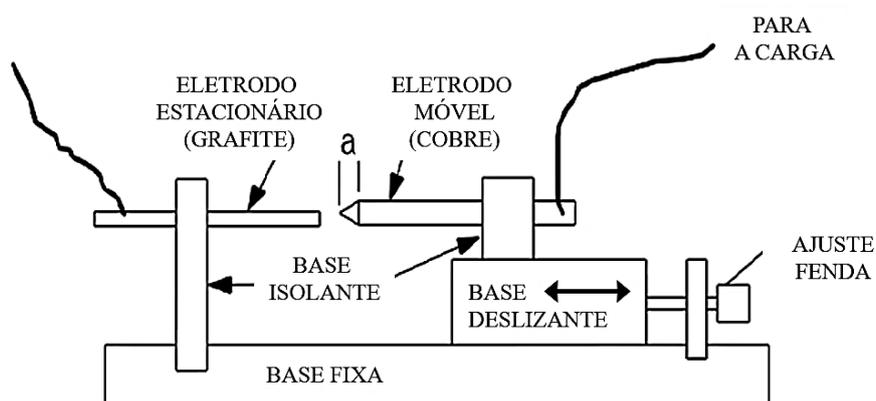
Fonte: adaptado de (UL, 1999).

Um dos aspetos mais desafiadores com relação à confiabilidade dos dispositivos de proteção contra a falta de arco é a dificuldade de distinguir a operação normal de um equipamento e a operação com a ocorrência da falta. Esse fato deve-se ao mascaramento das distorções causadas pelo fenômeno que algumas cargas podem gerar, como é o caso

de um aspirador de pó. Por esse motivo existe uma seção na norma UL 1699 (UL, 1999) que trata justamente sobre esse problema.

Um outro dispositivo gerador de arco também pode ser usado nesse tipo de teste. Através dele é possível inserir um arco tipo série em linha com uma carga que provoque o mascaramento da falta arco, mas que continue em operação. Esse é o dispositivo escolhido para realizar os ensaios deste trabalho. O aparato consiste em dois eletrodos, um fixo, de grafite, e um móvel, de cobre. Ele permite o ajuste de distância entre os eletrodos, como pode-se observar na Figura 24.

Figura 24 - Esquema do gerador de arco construído.



Fonte: adaptado de (UL, 1999).

Conforme a norma, a geração do arco deve ocorrer da seguinte forma: no primeiro momento, após a conexão das cargas, os eletrodos devem estar encostados, proporcionando um contato elétrico de baixa resistência, permitindo a operação em regime normal da carga. O arco irá surgir através do afastamento gradual dos eletrodos, o qual deve ser o suficiente para geração do arco de maneira persistente. Caso a fenda seja muito grande, o arco cessará.

O protótipo construído manteve uma razoável similaridade com o padrão preconizado na norma. A ponta do eletrodo de cobre, móvel, foi obtida através do torneamento de uma barra de cobre $\frac{1}{2}$ polegada. Já para o eletrodo fixo, de grafite, foi utilizado grafite tipo B2 com 5,6 mm de diâmetro, como pode-se observar na Figura 25.

Figura 25 - Eletrodos utilizados na construção do gerador de arco.

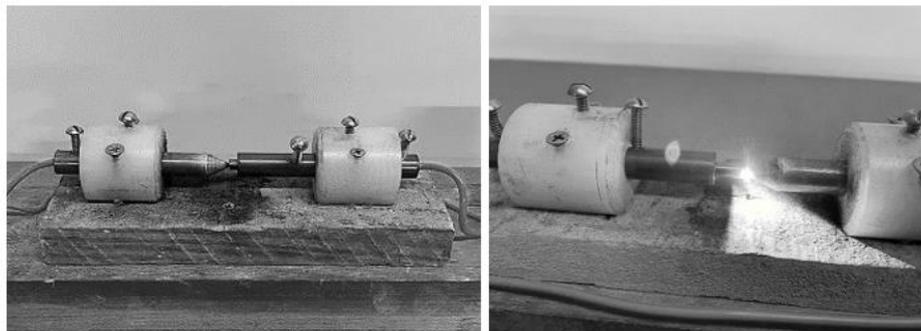


Fonte: elaborado pelo autor.

Os eletrodos de grafite apresentam certa fragilidade sendo necessária à sua substituição a cada 4 testes. Para o eletrodo de cobre, torna-se necessário sua limpeza do ponto de contato, realizada com esponja abrasiva, para retirada de fuligem provocada durante a ocorrência do arco.

O primeiro protótipo foi construído sem a possibilidade de ajuste milimétrico da distância entre os eletrodos, conforme ilustra a Figura 26.

Figura 26 - Primeiro protótipo do gerador de arco.

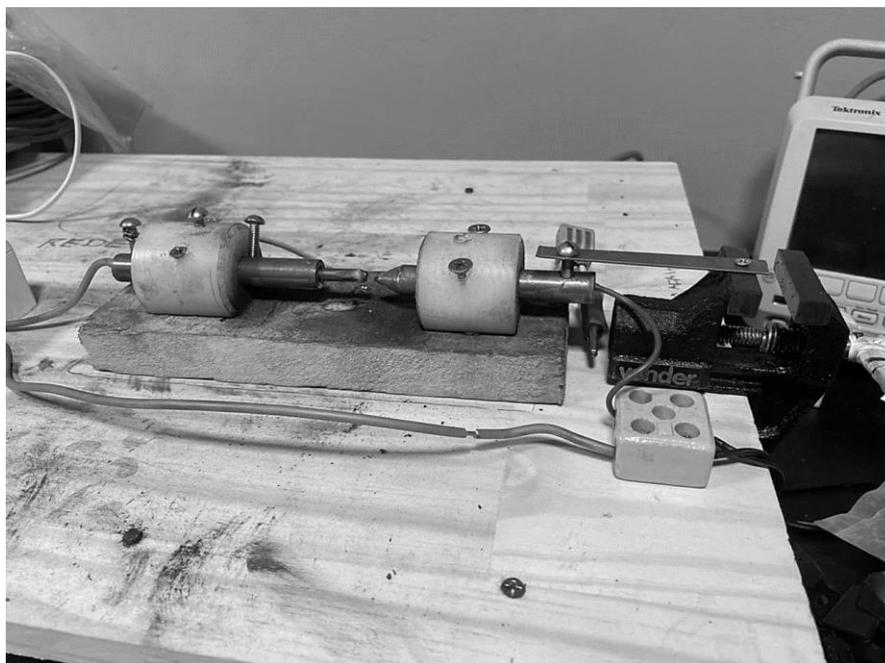


Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo foi capaz de produzir o arco, contudo o processo era demorado, pois o controle era feito manualmente dificultando a alocação da distância capaz de provocar o arco sem interromper a corrente de carga.

Com objetivo de facilitar o processo de medições, foi adaptado uma morsa de bancada de modo a utilizar o seu mecanismo de abertura como um controle da distância de fenda mais aprimorado. Essa adaptação permitiu variar de forma mais suave e uniforme a distância da fenda, poupando tempo nos ensaios. A foto desse protótipo é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Segundo protótipo gerador de arco regulagem da fenda.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 SELEÇÃO DE CARGAS

Para a condução dos ensaios buscou-se a utilização dos equipamentos mais comuns em residências e também àqueles que produzem maior distorção da forma de corrente de carga, atribuindo assim aos testes cenários com maiores dificuldades. Para tal, foram selecionados 16 equipamentos com distintas potências e fatores de potência (FP) variados, gerando assim diferentes taxas de distorção harmônicas no sinal de corrente.

3.2.1 Características Elétricas Dos Equipamentos

Conforme pode-se observar na Tabela 4, a amostra de equipamentos escolhidos buscou contemplar uma variação significativa, tanto nas suas potências quanto nas distorções na forma de onda que as cargas provocam. Essa variação na taxa de distorção harmônica (TDH) encontra-se na faixa de 2 a 33.7%. Os equipamentos contemplam também a

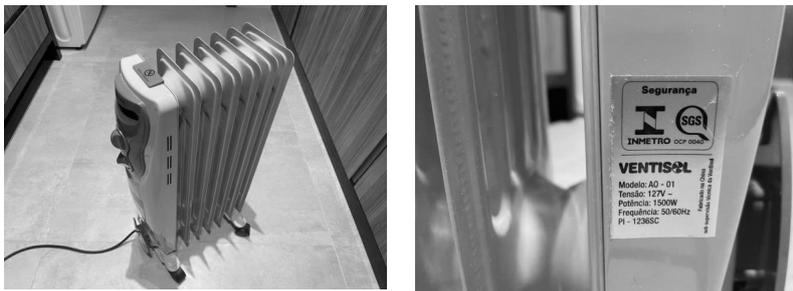
variação no F.P, no *range* de 0.93 até o valor unitário. A Tabela 4 mostra os equipamentos utilizados para formação das cargas dos ensaios realizados.

Tabela 3 - Equipamentos elétricos utilizados

Equip.	Descrição Carga	Tensão Elétrica [V]	Corrente [A]	F.P.	TDH (%)
1	Aquecedor A água	127,00	4,0526	1,0000	2,0034
2	Aquecedor B água	220,00	3,3593	1,0000	2,1123
3	Aquecedor Ambiente	127,00	10,753	1,0000	1,8003
4	Furadeira de Impacto	127,00	2,9589	0,98987	16,210
5	Pulverizador	127,00	4,8657	0,99984	9,3201
6	Cafeteira Cápsulas	127,00	10,597	1,0000	2,3021
7	Aspirador de Pó	127,00	6,5457	0,98975	18,901
8	Micro-ondas	127,00	12,124	0,93794	33,701
9	Mixer	127,00	1,5987	1,0000	3,8032
10	Serra circular	127,00	6,2764	0,97894	20,601
11	Refletor LED	127,00	0,15748	1,0000	2,2012
12	Computador	127,00	0,75487	0,99987	13,701
13	Secador de cabelo	127,00	13,473	1,0000	2,1012
14	Furadeira Pequena	127,00	1,9473	1,0000	3,0034
15	Pipoqueira	127,00	8,3467	1,0000	2,6012
16	Esmerilhadeira	127,00	3,2167	0,99986	16,801

De modo ilustrativo as Figuras 28 e 29, aquecedor de ambientes e secador de cabelos, mostram as fotos dos equipamentos com as maiores potências, F.P unitário e baixa TDH.

Figura 28 - Aquecedor de ambientes (equipamento 3).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29 - Secador de cabelo (equipamento 13).



Fonte: elaborado pelo autor.

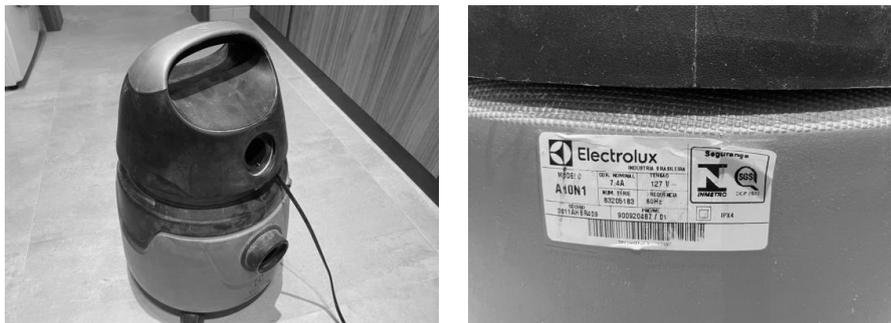
As Figura 30, Figura 31 e Figura 32, respectivamente, furadeira de impacto, aspirador de pó e serra circular, apresentam altas TDH e F.P. diferente de 1.

Figura 30 - Furadeira de impacto (equipamento 4).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 31 - Aspirador de pó (equipamento 7).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32 - Serra circular (equipamento 10).

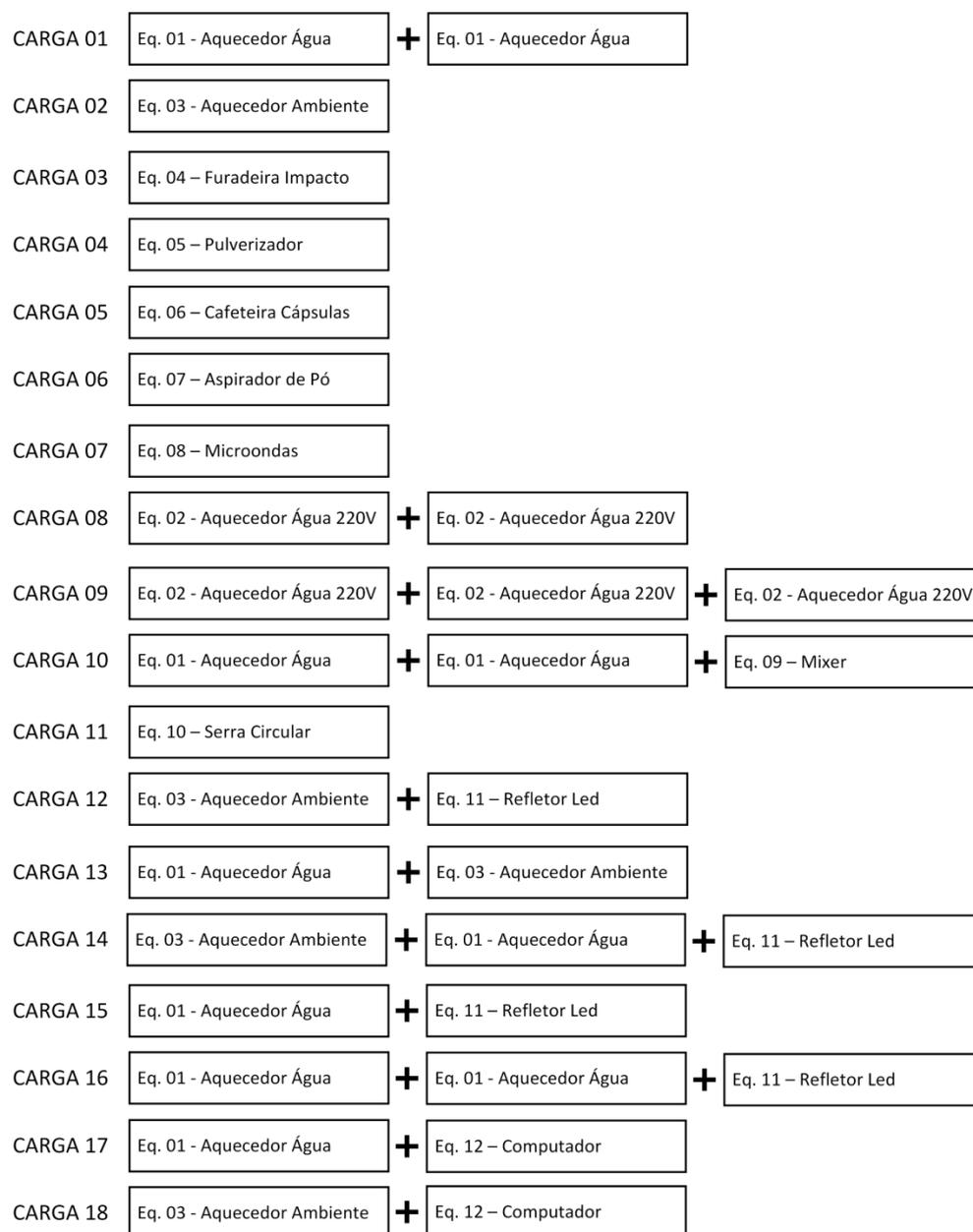


Fonte: elaborado pelo autor.

O restante das imagens com os equipamentos pode ser encontrado no Apêndice 3.

3.2.2 Composição Das 37 Cargas Utilizadas

Uma vez definidos os equipamentos a serem utilizados, foram estabelecidas cargas a partir da combinação em paralelo desses equipamentos de forma a se obter 37 cargas com características distintas umas das outras. Alguns exemplos de combinações de equipamentos formadores das cargas são mostrados na Figura 33 (carga 1 a 18). As demais combinações (carga 19 a 37) encontram-se no Apêndice 4.

Figura 33 - Composição das cargas de 1 a 18.

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nessa formação de cargas foram realizados ensaios em operação normal e as principais características foram registradas a fim explicitar a variação do tipo de carga utilizada nesse estudo, conforme mostra na Tabela 5.

Tabela 4 - Característica das cargas utilizadas, em operação normal.

Carga	Tensão Elétrica (V)	Corrente (A)	F.P.	TDH (%)
1	127,00	8,1012	1,0000	2,0154
2	127,00	10,723	1,0000	1,8845
3	127,00	2,9012	0,98014	16,284
4	127,00	4,8021	0,99120	9,3315
5	127,00	10,023	1,0000	2,3125
6	127,00	6,5142	0,98021	18,941
7	127,00	12,123	0,93120	33,734
8	220,00	6,6201	1,0000	2,3410
9	220,00	9,6301	1,0000	1,9161
10	127,00	8,5142	1,0000	3,8016
11	127,00	6,2021	0,97015	20,615
12	127,00	10,801	1,0000	2,2034
13	127,00	17,520	1,0000	2,3014
14	127,00	14,313	1,0000	1,9034
15	127,00	4,3021	1,0000	3,9151
16	127,00	8,3501	1,0000	2,5034
17	127,00	4,8301	0,99014	13,734
18	127,00	11,220	1,0000	4,4013
19	127,00	13,021	1,0000	2,1014
20	127,00	13,350	1,0000	3,3420
21	127,00	13,130	1,0000	2,4201
22	127,00	10,850	0,98127	14,441
23	127,00	5,2401	1,0000	4,4201
24	127,00	8,0023	1,0000	3,4301
25	127,00	9,0041	1,0000	2,2440
26	127,00	8,3024	1,0000	2,6046
27	127,00	8,4022	1,0000	3,5304
28	127,00	11,903	1,0000	2,2001
29	127,00	17,501	1,0000	1,8064
30	127,00	11,521	1,0000	4,8024
31	127,00	9,0021	1,0000	2,4100
32	127,00	3,2010	0,99147	16,801
33	127,00	11,057	1,0000	4,3012
34	127,00	13,530	1,0000	3,0540
35	127,00	6,7012	0,98387	21,143
36	127,00	13,901	1,0000	7,9001
37	127,00	16,121	1,0000	6,6301

Algumas avaliações estatísticas sobre a variedade das cargas são apresentadas na Tabela 5. Nela é possível visualizar os valores médios, o desvio padrão, valor mínimo, mediana e valor máximo.

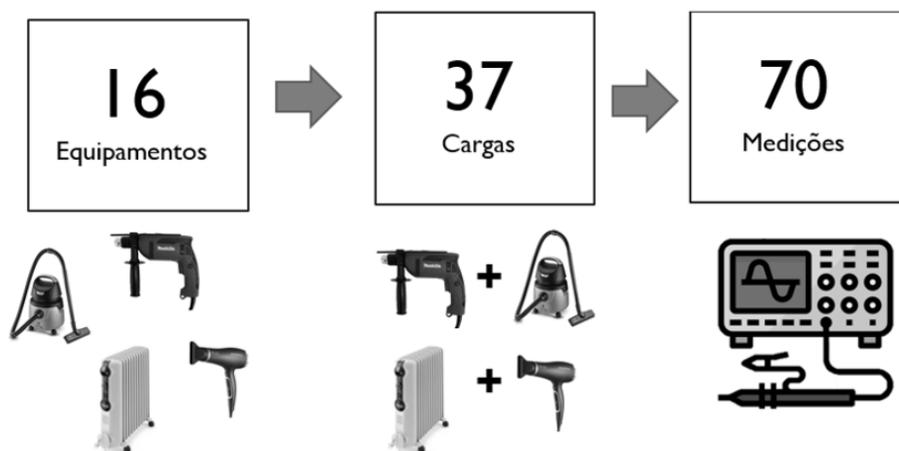
Tabela 5 - Variação das características das cargas 37 cargas utilizadas

	Média	Desv. Padrão	Valor Min.	Mediana	Máx.
Cor. Elétrica [A]	9,7463	3,779	2,901	9,630	17,520
Fator de Pot.	0,99459	0,01311	0,93120	1,00000	1,00000
TDH [%]	6,86	7,45	1,81	3,43	33,73

3.3 ENSAIOS (COM E SEM ARCO ELÉTRICO)

Com base nas 37 cargas definidas, foram realizados os ensaios em operação normal e na presença da falta arco tipo série. No total foram realizadas 70 medições. Não foram efetuados ensaios de operação com falta arco para as cargas 06 (cafeteira de cápsulas), 08 (micro-ondas), 17 (aquecedor de água + computador) e 18 (Aquecedor de ambiente + computador). Durante a condução dos experimentos, as cargas citadas não conseguiram seguir em funcionamento durante a ocorrência do arco devido à intermitência na condução da corrente de arco em função dos controladores microprocessados dos equipamentos envolvidos. A Figura 34 sumariza o arranjo feito entre equipamentos, cargas e medições.

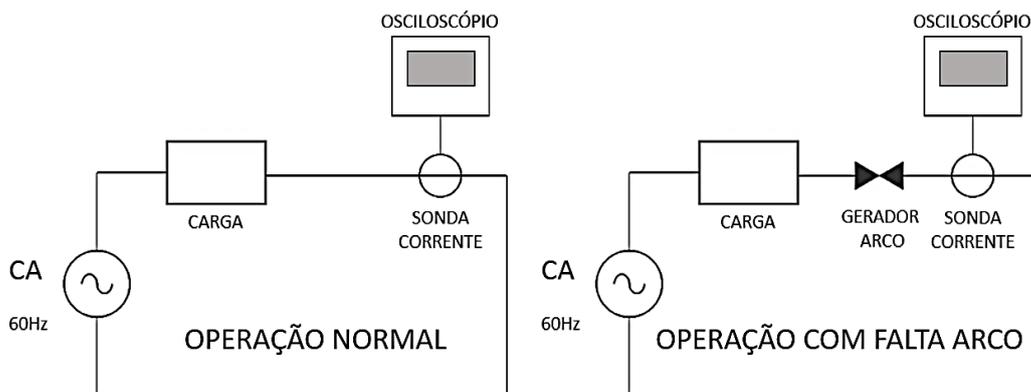
Figura 34 - Equipamentos, cargas e medições.



Fonte: elaborado pelo autor.

Foram realizados testes de operação em condições normais de funcionamento e na presença da falta arco tipo série, ligada em série com a carga em estudo, conforme o esquema apresentado na Figura 35:

Figura 35 - Esquema genérico de teste com e sem falta arco tipo série.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.1 Instrumentação Utilizada

Como premissa optou-se pela utilização de equipamentos disponíveis no laboratório, sem o desenvolvimento de uma instrumentação com maior nível de

complexidade. Para isso foi utilizado um osciloscópio da marca Tektronix modelo DPO2014b e suas principais especificações desse osciloscópio são:

- a) 100 MHz de largura de banda;
- b) 4 canais analógicos;
- c) 1 GS/s de taxa de amostragem em cada canal;
- d) capacidade de armazenamento de 1 milhão de pontos por medida;
- e) 5000 wfm/s máxima para captura de forma de onda;
- f) Tempo de subida aproximadamente $0,35/BW = 3,5$ ns.
- g) Resolução 8 bits

Para esse estudo seria desejável uma resolução maior do que 8 bits, além de uma maior capacidade de armazenamento por medida, contudo, devido ao contexto na ocasião em que foram realizados os ensaios, utilizou-se o equipamento que foi disponibilizado.

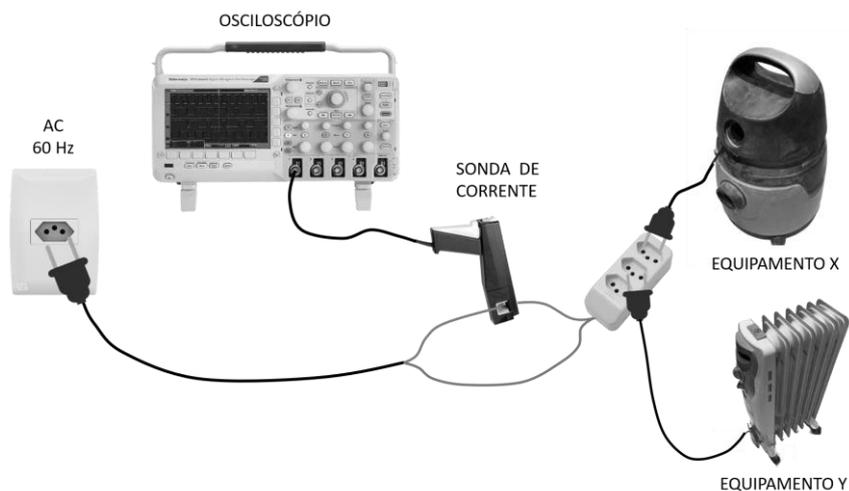
A captação do sinal de corrente foi realizada com a sonda de corrente do mesmo fabricante, modelo TCP0150, cujas suas principais são:

- a) sensibilidade mínima: 5 mA (osciloscópio com 1 mV/div);
- b) corrente máxima RMS: 150 A;
- c) corrente de pico máxima: 500 A;
- d) largura de banda 20 MHz;
- e) tempo de subida ≤ 17.5 ns;
- f) precisão típica 1% e máxima de 3% de erro para ganho CC.

3.3.2 Esquema De Ligação

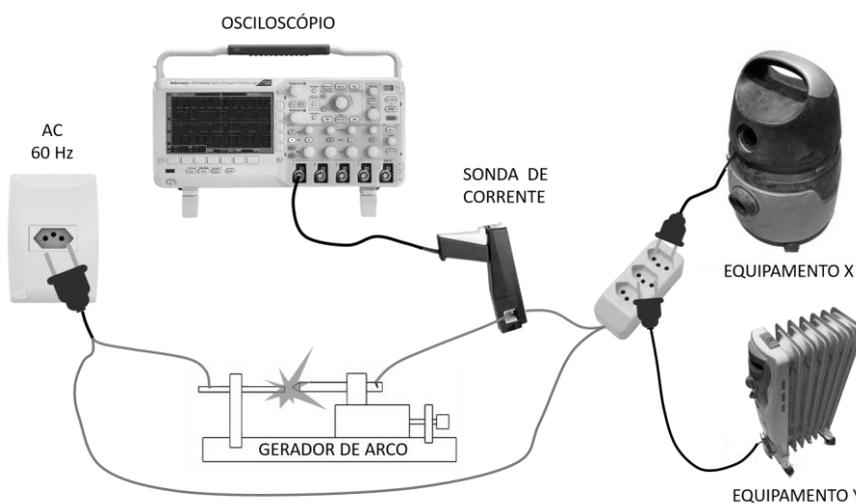
Foram realizados ensaios com as cargas em estado de operação normal e sem falta arco tipo série, conforme ilustrado pelas Figura 36 e Figura 37 respectivamente.

Figura 36 - Esquema do ensaio de cargas sem falta arco série.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 37 - Esquema de ensaio de cargas com falta arco série.



Fonte: elaborado pelo autor.

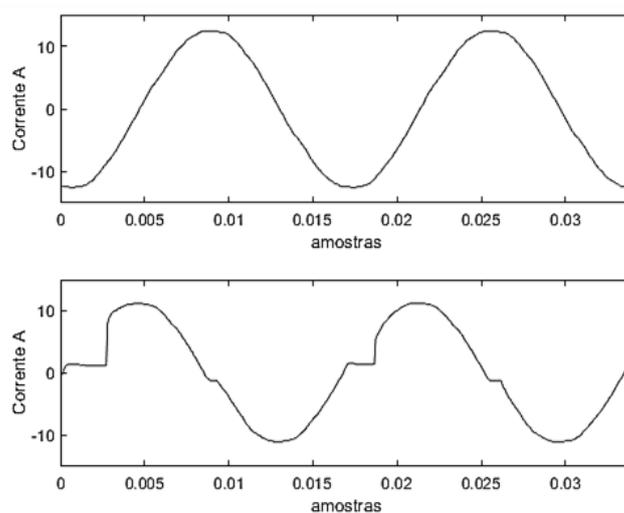
3.3.3 Realização Das Medidas

Os sinais de corrente de carga foram obtidos através dos esquemas experimentais mostrados nas Figuras 36 e 37. Para os testes envolvendo o arco elétrico, inicialmente os eletrodos foram posicionados promovendo um contato elétrico adequado de modo a não interferir na corrente de carga. Após ligar a carga, o eletrodo móvel foi sendo afastado

lentamente até que fosse possível visualizar a luz gerado pelo arco ocorrido pela falta de pressão entre os eletrodos que conduziam a corrente. A forma de onda no momento da ocorrência do arco foi armazenada em um *pendrive* e posteriormente avaliada no software Matlab versão R2020b.

A forma de onda obtida nos primeiros ensaios apresentou topologia característica desse tipo de falta, conforme (MARTEL, 2018), onde aparecem as distorções (ombros) próximo à passagem pelo eixo zero, indicando que o protótipo reproduziu de maneira fidedigna a forma de onda característica para esse tipo de fenômeno. A Figura 38 ilustra tais formas de onda.

Figura 38 - Corrente da carga sem arco (superior) e com arco (inferior).



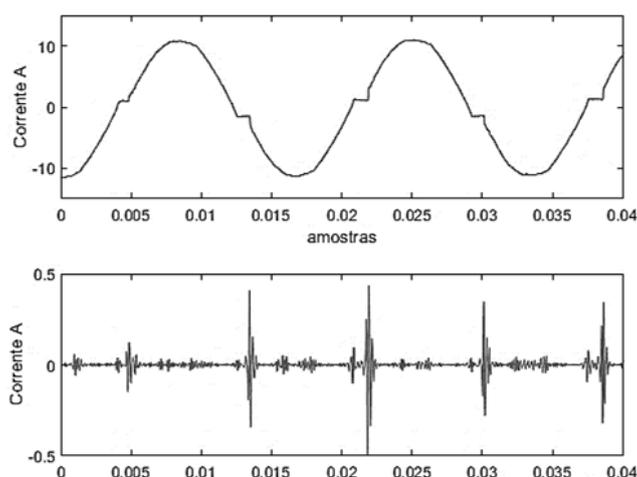
Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.4 Frequência De Amostragem

Tendo em vista as componentes em baixa e alta frequências produzidas pela falta arco, optou-se pela escolha da frequência de amostragem mais alta possível com os equipamentos disponíveis. Nesse contexto, considerando o limite da largura de banda da sonda de corrente, a frequência de amostragem escolhida foi a de 31.3 MHz. Essa escolha

teve também como premissa a capacidade de armazenamento do osciloscópio, possibilitando registrar pelo menos dois ciclos, ou 33 ms. A Figura 39, mostra o sinal de corrente de carga e o sinal da decomposição, nível de detalhe $d1$, da TW, com uma frequência de amostragem de 31.3 MHz.

Figura 39 - Sinal de corrente com arco (superior) e $d1$ da TW (inferior).



Fonte: elaborado pelo autor.

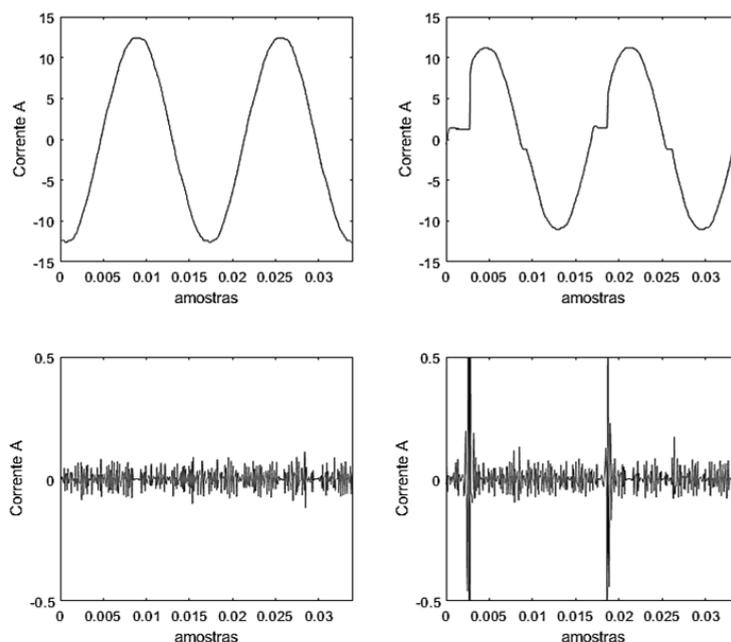
Conforme pode ser constatado na Figura 39, verifica-se que essa frequência foi suficiente para a identificação de forma clara das distorções características. Contudo, na prática o tamanho das amostras exige um esforço computacional considerável, por isso foram avaliadas alternativas para redução da taxa de amostragem. No caso, a técnica de *downsampling* foi empregada, sendo capaz de preservar o nível de detalhes necessário para a decomposição espectral utilizada na metodologia.

Foram realizados testes com diferentes frequências que variaram desde 5 kHz até a frequência de amostragem original. Através da avaliação da resolução obtida com a decomposição do sinal através da TW optou-se pela frequência de 40 kHz.

A Figura 40 mostra quatro sinais: o superior à esquerda representa o sinal de corrente de carga sem a falta arco; o superior à direita ilustra o sinal com a presença do

arco elétrico. Abaixo são apresentados os níveis de detalhes $d1$ da TW, onde é possível constatar que a técnica de *downsampling*, reduzindo a frequência de amostragem para 40 KHz, é capaz de reproduzir o sinal de arco característico com resolução adequada.

Figura 40 - Sinais de corrente e $d1$, sem arco (esquerda) e com arco (direta).



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4 EXTRAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS (TW)

Com base na utilização da TW, para este estudo foi aplicada a wavelet mãe da família Daubechies, com suporte 10 até o quinto nível de decomposição, do sinal de corrente de carga.

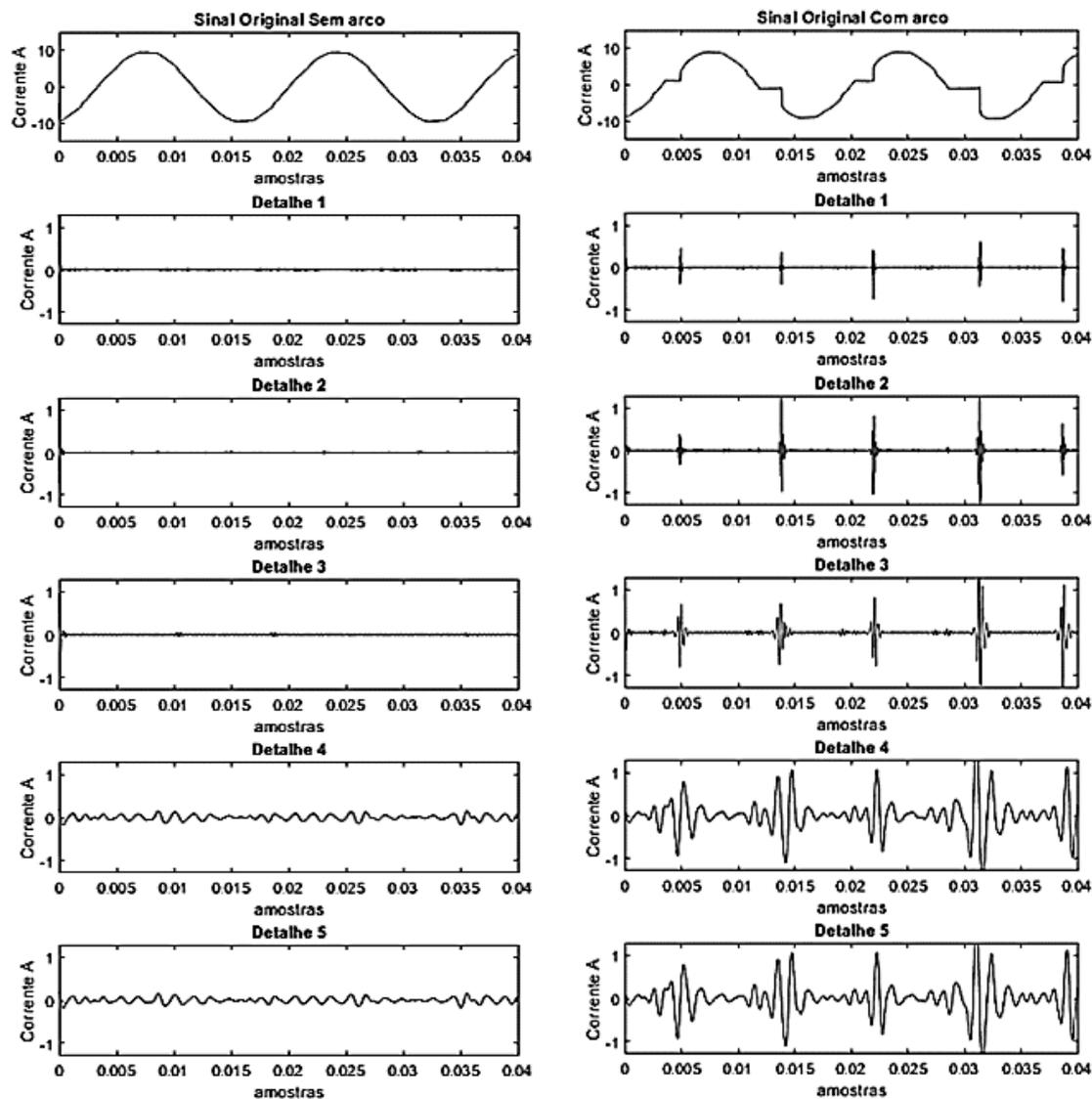
Os sinais foram então decompostos conforme especificações apresentadas na Tabela 7:

Tabela 6 - Decomposição wavelet para frequência de amostragem de 40 kHz.

	Faixas de frequência TW
Nível 1 – $d1$	10.000 a 20.000 Hz
Nível 2 – $d2$	5.000 a 10.000 Hz
Nível 3 – $d3$	2.500 a 5.000 Hz
Nível 4 – $d4$	1.250 a 2.500 Hz
Nível 5 – $d5$	623 a 1.250 Hz
Aprox.	0 a 623

Os gráficos dos detalhes da decomposição através da TW mostram claramente sinais das perturbações relacionadas com a ignição e extinção do arco, que ocorre na passagem pelo eixo zero do sinal de corrente, conforme mostra a Figura 41. Nesta figura são apresentados dois grupos de sinais: o da esquerda sem a falta arco e o da direita com a falta arco. Logo abaixo de cada sinal são mostrados os níveis de detalhes da decomposição utilizando a TW. No caso são mostrados 5 níveis de detalhes, $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ e $d5$, onde o $d1$ representa o nível com a banda de maior frequência e $d5$ com a banda de menor frequência.

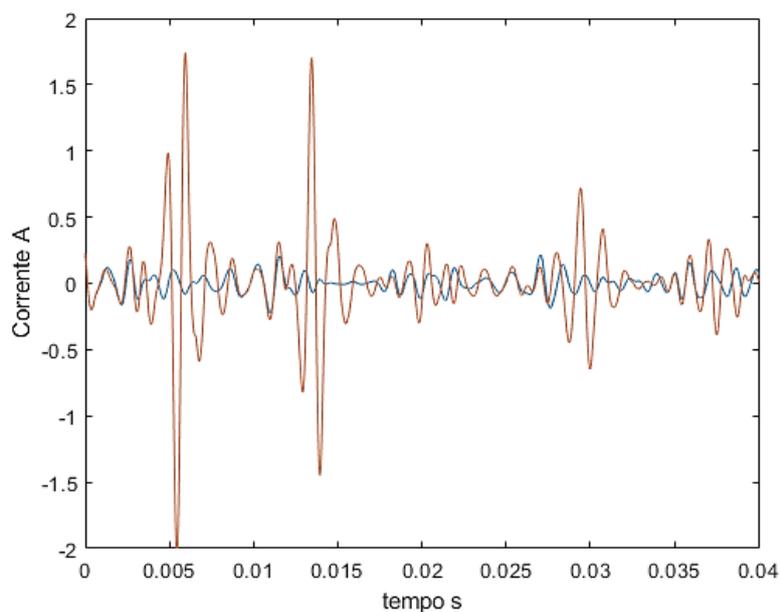
Figura 41 - Gráfico dos detalhes da TW com e sem arco.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para contextualização, na Figura 42 pode-se observar a variação na amplitude do sinal do detalhe *d5* da decomposição do sinal de corrente obtido no ensaio com um aquecedor de água em operação normal (azul) e na presença de arco tipo série (vermelho).

Figura 42 - Sobreposição do sinal dos $d5$ da carga com e sem arco série.



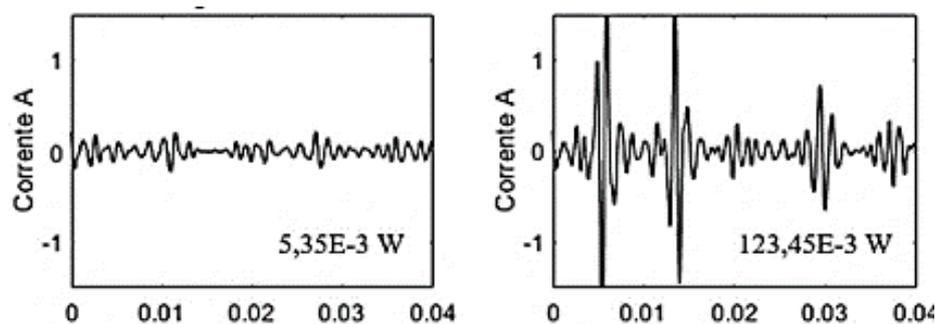
Fonte: elaborado pelo autor.

A curva com maior amplitude representa a condição com arco, enquanto a curva com menor amplitude a condição sem arco. Buscando distinguir a situação de operação normal da operação com falta arco foi utilizado como parâmetro a potência do sinal original e a potência dos outros 5 sinais de cada nível de detalhe. A potência média, no intervalo n_1 e n_2 , de um sinal discreto $x[n]$ pode ser dada em (20).

$$P_{[n_1, n_2]} = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{n=n_1}^{n_2} |x[n]|^2 \quad (20)$$

Pode-se observar na Figura 43 os gráficos do quinto nível de detalhes $d5$ da decomposição usando TW, e as os respectivos valores de potência com e sem arco tipo série.

Figura 43 - Potência do sinal do nível de detalhe *d5* de carga resistiva com arco (direita) e sem arco (esquerda).



Fonte: elaborado pelo autor.

Quantitativamente, o valor da potência do sinal do quinto nível de detalhe sem arco é de $5.35E-3W$ enquanto na ocorrência do arco esse valor sobe para $123.45E-3W$.

A partir do estabelecimento da potência do sinal e dos níveis de detalhes como o parâmetro a ser utilizado para a detecção do arco tipo série, os dados foram tabulados. A Tabela 8 fornece a potência dos níveis de detalhe *d1* a *d5* associados a decomposição da TW para as cargas de 1 a 3.

Tabela 7 - Tabulação dos dados obtidos nos ensaios

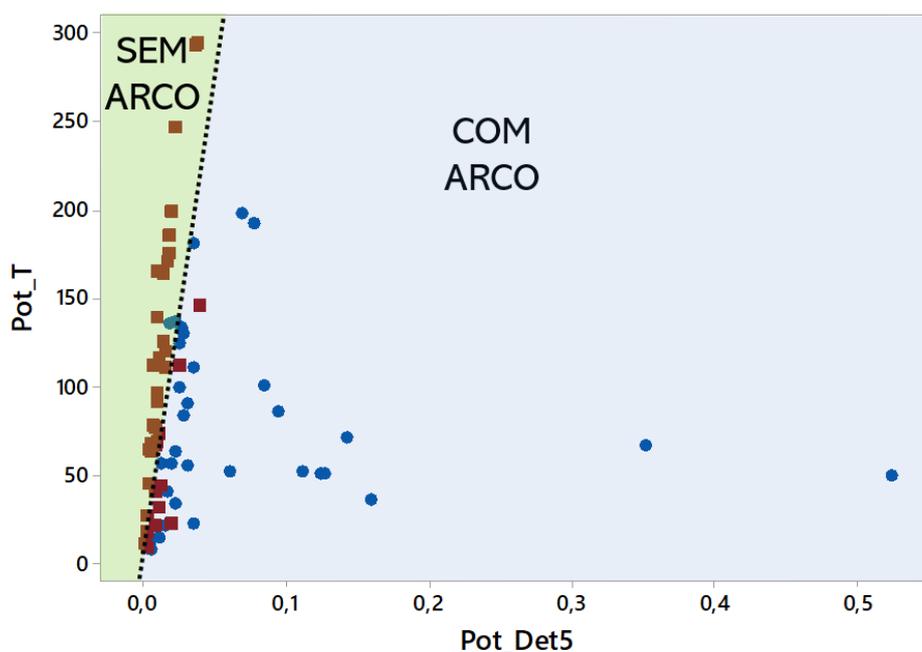
Carga	Pot_T	Pot_d1	Pot_d2	Pot_d3	Pot_d4	Pot_d5	Operação
1	63,21930	0,00398	0,00268	0,00182	0,00424	0,00535	S/ARCO
2	50,27080	0,00722	0,01169	0,01388	0,02676	0,12345	C/ARCO
3	110,60240	0,00677	0,00457	0,00307	0,00816	0,01512	S/ARCO
...

Ao analisar a Tabela 7 é possível perceber uma alteração no valor da potência dos detalhes quando da ocorrência de um arco. Contudo, não é possível, de maneira empírica,

estabelecer um limite no valor dessa potência a fim de balizar um valor de referência que acima deste, estaria caracterizada a presença do da falta tipo arco série.

Ao observar os gráficos de dispersão das 70 medições é possível visualizar a possibilidade da implementação de um classificador binário que seja capaz de separar as medidas com arco das medidas sem arco. Nesse contexto, a Figura 44 mostra um gráfico de dispersão dos valores da potência do nível de detalhes $d5$, com a presença de arco, pontos azuis, e sem a presença do arco, pontos em laranja.

Figura 44 - Gráfico de dispersão utilizando a potência do sinal do detalhe $d5$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme é notório na Figura 44, é possível separar, através de uma reta, as medidas com e sem a falta arco.

3.5 MODELO INTELIGENTE SVM

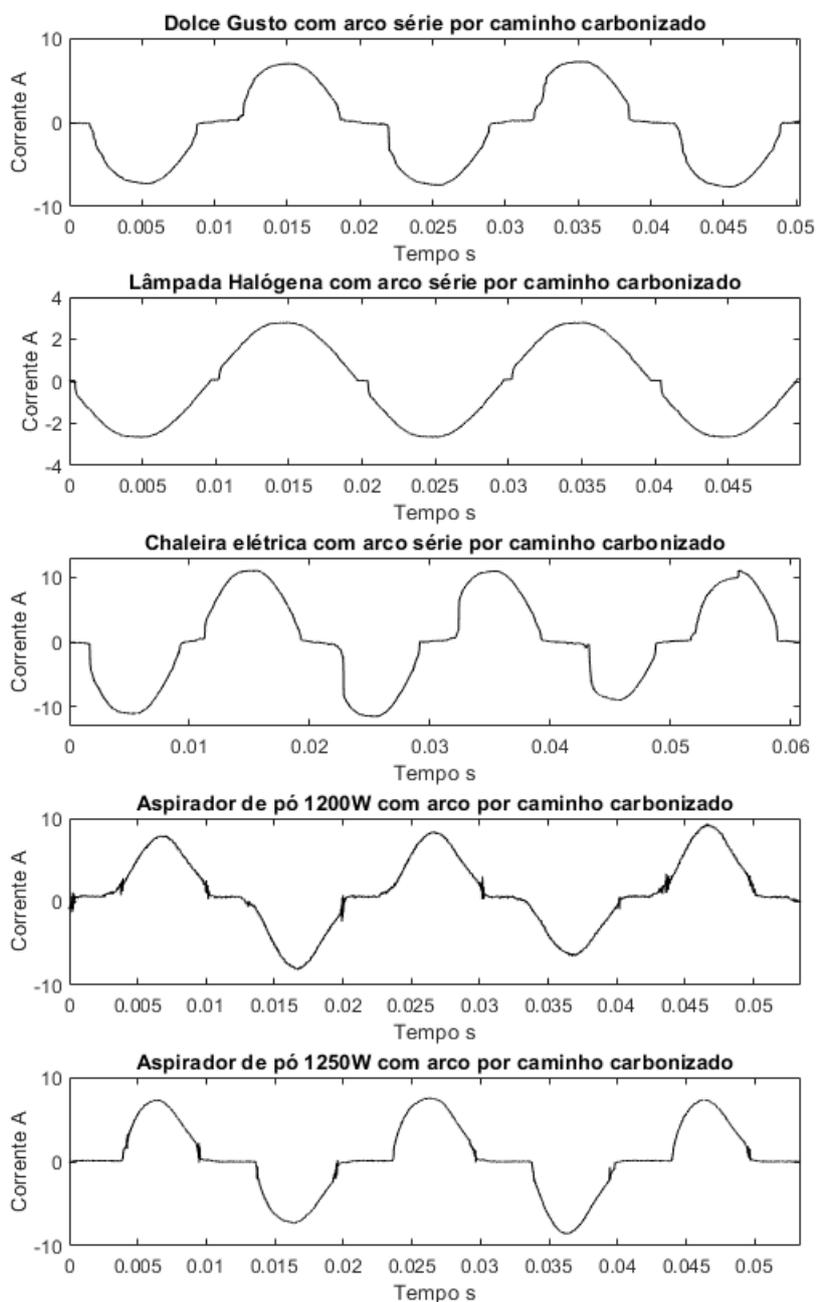
O modelo classificador inteligente foi baseado na teoria da máquina de vetores de suporte SVM e implementado através da ferramenta comercial disponível no software

Matlab, versão R2021b, chamada “*CLASSIFICATION LEARNER*”. Foi utilizada configuração de otimização dos hiperparâmetros. Essa opção permite a variação de parâmetros como a função *kernel*, parâmetro de margem e parâmetro de controle visando reduzir o erro do modelo.

Foram desenvolvidos 5 modelos distintos através da variação dos preditores e da metodologia de treinamento e validação, resubstituição, holdout e validação cruzada k-fold.

Adicionalmente, os modelos desenvolvidos foram testados com sinais externos extraídos de um estudo experimental com foco em arcos tipo série. Os sinais foram obtidos através do site Zenodo, que é um repositório de acesso aberto de propósito geral desenvolvido sob o programa European OpenAIRE (ZENODO, [s. d.]). Tal repositório permite que os usuários depositem artigos, conjuntos de dados, software, relatórios e quaisquer outros recursos digitais. Os ensaios usados como base de comparação foram realizados em uma rede elétrica de 50 Hz, diferentemente dos ensaios do presente trabalho que foram realizados em uma rede de 60 Hz. Além desse fato, os sinais de tal repositório foram obtidos através de ensaios realizados com a geração de arco por caminhos carbonizados e não com eletrodos com variação da distância, como o caso do protótipo construído neste trabalho. Apesar dessas diferenças, o modelo apresentou uma boa capacidade de correta classificação. Os sinais utilizados são apresentados na Figura 45, que mostra a topologia de 5 sinais da corrente de carga com falta arco produzido por caminho carbonizado.

Figura 45 - Sinais externos utilizados para teste do modelo.



Fonte: (PATRICK; FRANCESCO, 2020)

Na Figura 51, de cima para baixo, são apresentados os sinais de corrente das cargas com falta arco por caminho carbonizado dos seguintes equipamentos: Cafeteira de cápsulas, lâmpada halógena, chaleira elétrica, aspirador de pó de 1200 W e aspirador de pó de 1250 W.

Através da aplicação dos preditores identificados foi possível a implementação de um modelo classificador utilizando aprendizagem de máquina.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os métodos e técnicas utilizados para a detecção de falta arco tipo série. Partindo da construção de um protótipo, passando pelo processo de decomposição do sinal de corrente pelo uso da TW, a metodologia foi consolidada através da implantação de um modelo classificador. O modelo implementado foi baseado na teoria da máquina de vetores de suporte (SVM), sendo possível também a aplicação de outros modelos utilizando árvore de decisão ou regressão logística. Ponto relevante do processo metodológico aqui apresentado foi a identificação dos possíveis preditores através da utilização da TW:

(i) observou-se uma diferença na amplitude dos sinais em determinadas faixas de detalhes se comparada a operação normal com a presença de arco série; (ii) constatou-se que a relação da potência total do sinal original, quando comparada com a potência do sinal em cada nível de decomposição, foi capaz de indicar a presença do arco.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos junto a esta pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

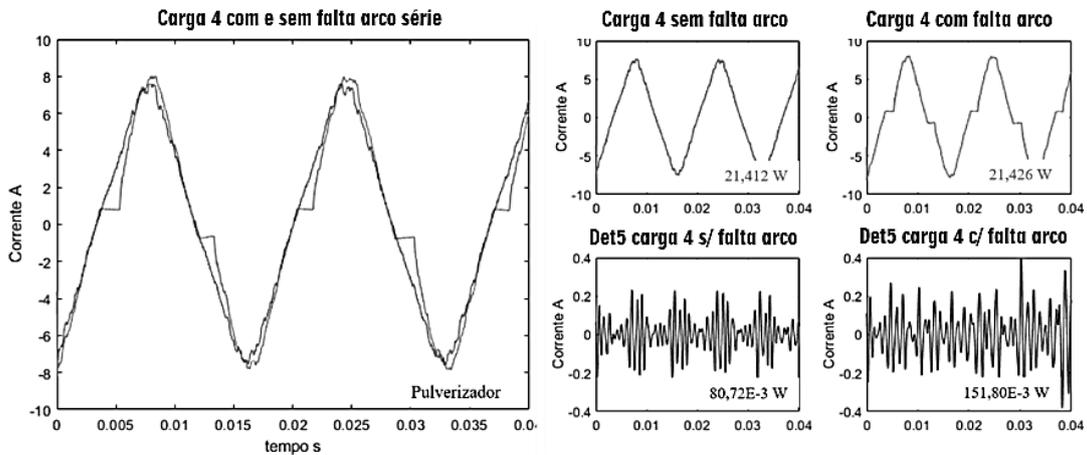
Este capítulo apresenta os resultados obtidos com base nos ensaios experimentais realizados. Através das medições do sinal de corrente das cargas em operação normal e na presença da falta arco tipo série, foi possível estabelecer parâmetros capazes de classificar o sinal de corrente de carga, identificando se há a ocorrência do fenômeno. Através da avaliação da potência do sinal de corrente e dos seus detalhes de decomposição utilizando a TW, foi possível distinguir de forma satisfatória a operação normal e a operação com a falta arco série.

São aqui apresentados os dados dos ensaios experimentais, a análise e tratamento desses sinais e a avaliação da metodologia por meio da implementação de um modelo classificador baseado na máquina de vetores de suporte ou *SVM*. Foram implementados uma série de modelos baseados em metodologias de validação e testes diferentes a fim de aferir a potencialidade do método.

4.1 INSPEÇÃO VISUAL DOS SINAIS

Após a aquisição dos dados e a decomposição do sinal da carga em 5 sinais referentes aos detalhes nas diferentes faixas de frequência, obteve-se o conjunto de gráficos de cada ensaio. Através desse conjunto de gráficos foi possível avaliar, de maneira visual, as distorções características do fenômeno arco série. Essas distorções são bem evidentes e estão centralizadas na região de cruzamento do eixo X. Além disto, observou-se que as amplitudes dos sinais de detalhe apresentam variações na amplitude durante a ocorrência do arco, quando comparado à operação normal. Para contextualizar, alguns desses sinais são apresentados a seguir nas Figuras 46, 47 e 48.

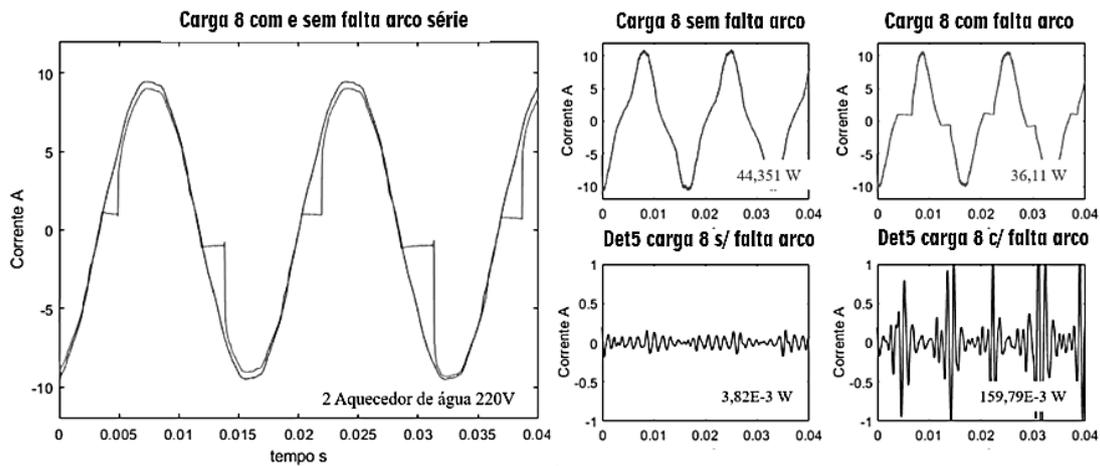
Figura 46 - Corrente da Carga 4 (Pulverizador 588 VA).



Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se observar, também, na Figura 46, a grande variação no valor da potência do sinal de detalhe 5 (*det5*) quando o arco ocorre. O valor da potência do sinal *det5* sem arco é de $80,72E-3W$ enquanto na ocorrência do arco esse valor sobe para $151,80E-3W$.

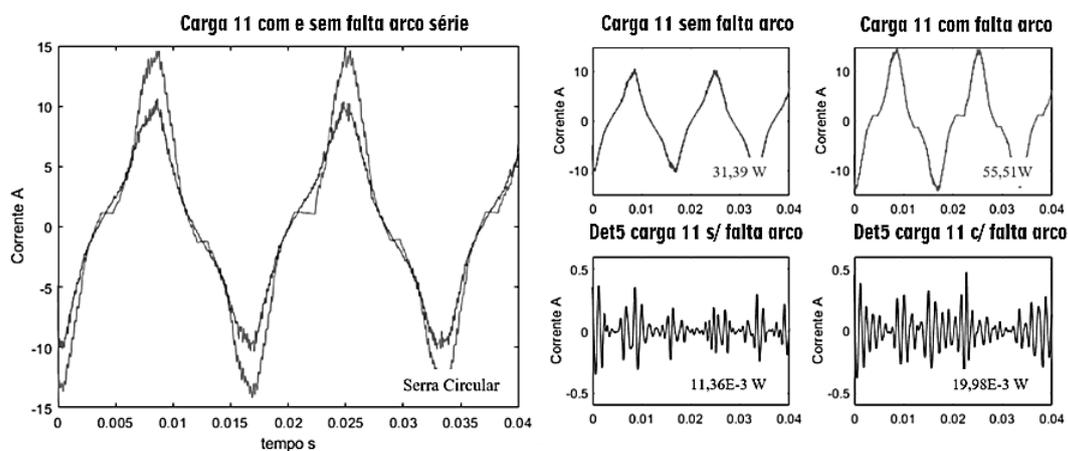
Figura 47 - Corrente da Carga 8 (2 Aquecedores de Água 220 V/1414 VA).



Fonte: elaborado pelo autor.

Uma variação ainda mais acentuada pode ser vista na Figura 47, para uma carga resistiva pura com potência aparente de 1414 VA. Mais um exemplo dessa variação é mostrado na Figura 48.

Figura 48 - Corrente da Carga 11 (Serra Circular 756 VA).



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando essas três figuras é possível observar uma variação significativa na amplitude dos sinais de detalhe que podem ser representadas pela potência do sinal, como indicado nos quatro subsinais à direita, nas referidas figuras. Esse foi, portanto, o parâmetro escolhido para desenvolver a metodologia de detecção. O restante dos gráficos, relacionados aos sinais de todas as cargas ensaiadas, pode ser encontrado no Apêndice 2.

4.2 TABULAÇÃO DOS DADOS

Através da aquisição dos sinais de corrente das cargas com e sem arco, foram realizadas as decomposições desses sinais com o uso da TW discreta em cinco níveis através da família Daubechies Db10.

A partir de cada sinal de corrente de carga obtido nos ensaios e os 5 sinais correspondentes aos níveis de detalhe da decomposição com a TW, foi construída uma tabela com o valor das suas respectivas potências. A Tabela 8 mostra os dados de algumas dessas cargas, onde Pot_T representa a potência do sinal de corrente de carga no período amostrado. Já Pot $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ e $d5$ representam a potência do sinal de detalhe

provenientes da decomposição do sinal de corrente de carga. A integralidade da tabela está disponível no Apêndice 1.

Tabela 8 - Amostra da potência das dez primeiras medições

Carga	Pot_T	Pot_d1	Pot_d2	Pot_d3	Pot_d4	Pot_d5	Operação
1	63,21930	0,00398	0,00268	0,00182	0,00424	0,00535	S/ARCO
2	50,27080	0,00722	0,01169	0,01388	0,02676	0,12345	C/ARCO
3	110,60240	0,00677	0,00457	0,00307	0,00816	0,01512	S/ARCO
4	85,24860	0,00771	0,01125	0,01659	0,03060	0,09458	C/ARCO
5	7,91720	0,00154	0,00430	0,00227	0,00092	0,00280	S/ARCO
6	7,47290	0,00128	0,00291	0,00322	0,00213	0,00521	C/ARCO
7	21,41250	0,00204	0,00229	0,00238	0,00593	0,00807	S/ARCO
8	21,42600	0,00205	0,00195	0,00212	0,00532	0,01518	C/ARCO
9	95,09830	0,00583	0,00390	0,00253	0,00425	0,00922	S/ARCO
10	40,21730	0,00430	0,01125	0,00281	0,00477	0,00817	S/ARCO
...

4.3 ANÁLISES GRÁFICAS E ESTATÍSTICAS

Com o objetivo de compreender as relações desses parâmetros com a existência do arco série, foram realizadas diversas avaliações estatísticas com os dados obtidos. A Tabela 9 mostra alguns dados estatísticos do valor da potência de cada sinal.

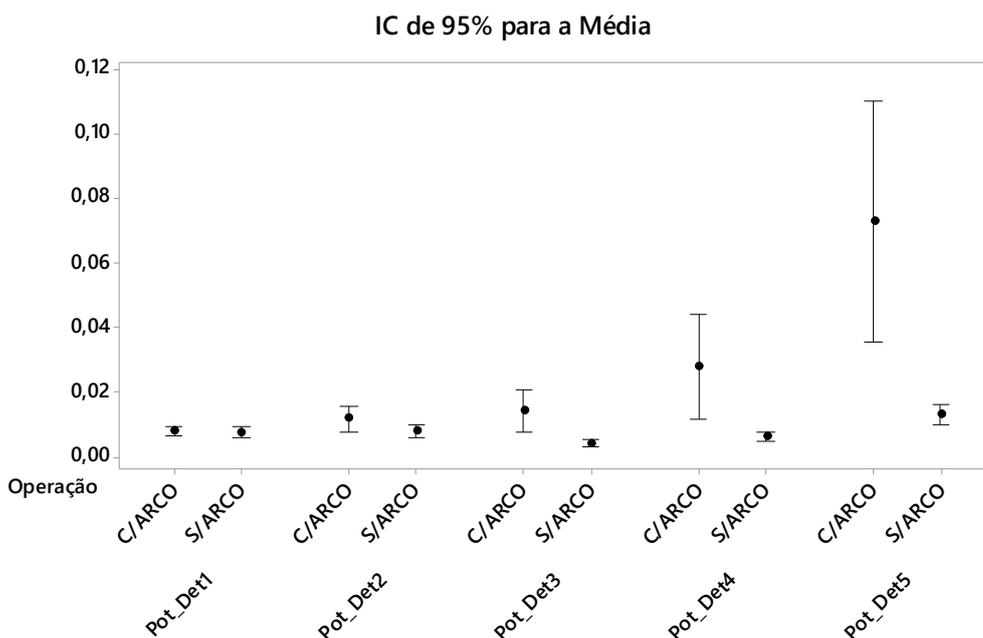
Tabela 9 - Variação de potência nos 70 ensaios

Pot. [W]	Média	EP Média	Desv. Padrão	Mín.	Mediana	Máx.
Pot. Sinal	92,54	7,84	65,61	7,47	75,03	293,72
Pot. Det1	0,00757	0,00053	0,00443	0,00023	0,00716	0,01873
Pot. Det2	0,00898	0,00162	0,01359	0,00046	0,00465	0,08390
Pot. Det3	0,00898	0,00162	0,01359	0,00046	0,00465	0,08390
Pot. Det4	0,01656	0,00394	0,03298	0,00052	0,00747	0,21599
Pot. Det5	0,04112	0,00932	0,07797	0,00153	0,01837	0,52252

Pode-se observar que a potência do sinal do quinto nível, *d5*, tem o maior valor entre os sinais resultantes da decomposição, o maior desvio padrão e a maior dispersão. No caso de haver relação entre a variação desse valor com a presença do arco, esse parâmetro poderá contribuir mais que os outros.

A visualização da variação de cada um dos parâmetros em cada condição de operação pode auxiliar na indicação de uma correlação entre os fatores e por isso foram traçados os gráficos de intervalo na condição com e sem arco, conforme ilustra a Figura 49.

Figura 49 - Intervalo valor da potência dos sinais *d1*, *d2*, *d3*, *d4* e *d5*.

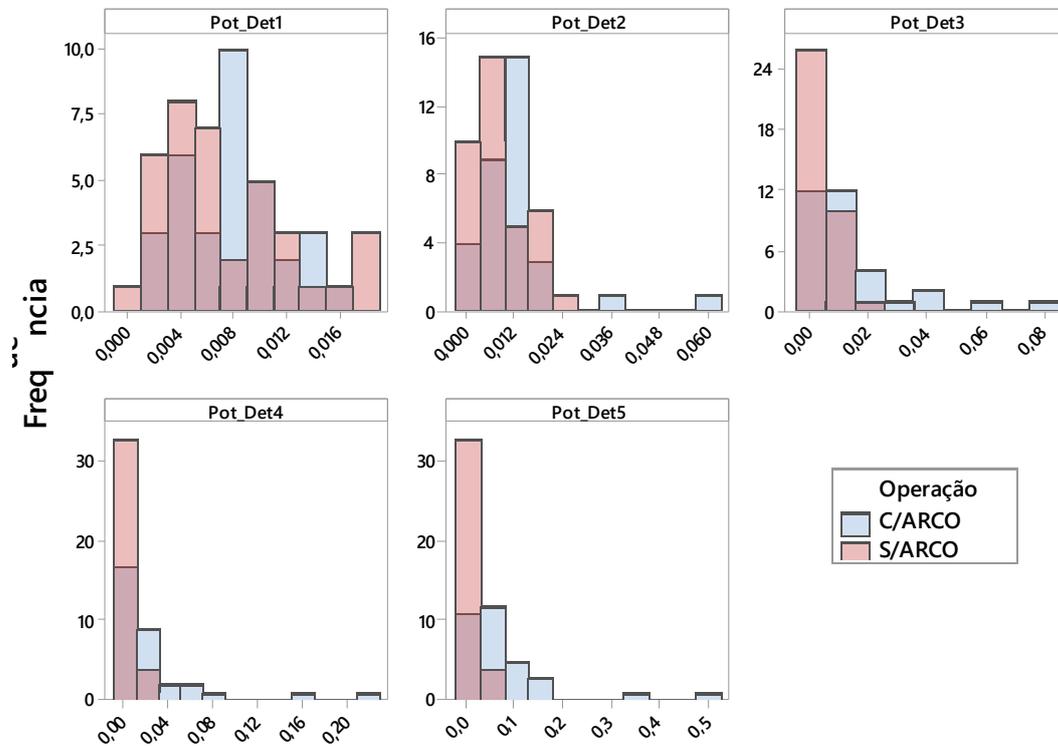


Fonte: elaborado pelo autor.

Através da análise do gráfico contido na Figura 49 é possível ponderar que os detalhes 3, 4 e 5 podem ser mais propensos a diferenciar os estados de operação, uma vez que se pode visualizar uma faixa de valores distinta para cada um dos modos. Além da faixa de variação, outra análise pertinente é a da frequência com que cada medição

aparece em determinada faixa nas situações com e sem arco, podendo ser identificado no histograma da Figura 50.

Figura 50 - Histograma do valor da potência dos sinais $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ e $d5$.

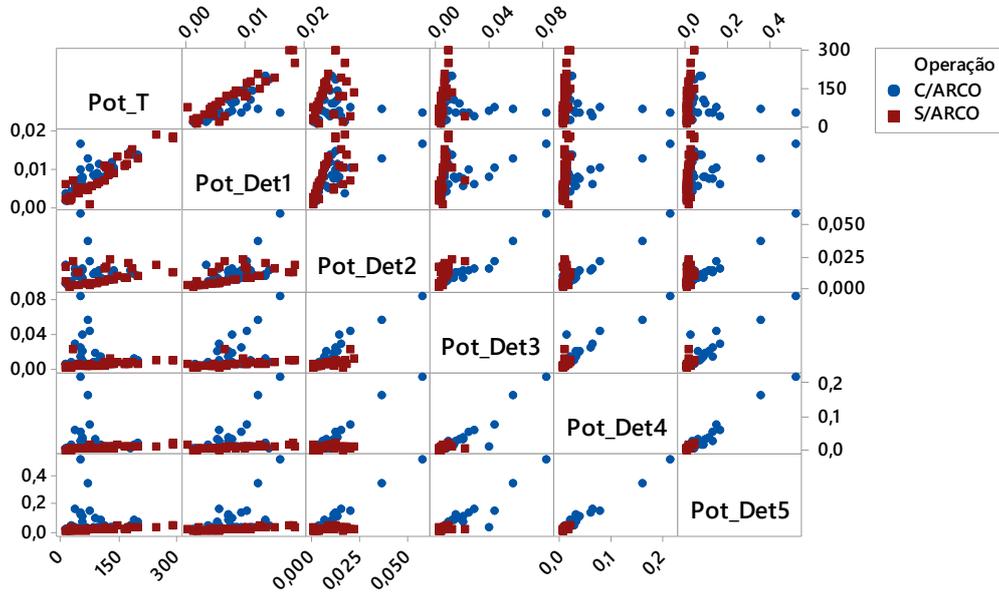


Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 50, quando menor a sobreposição das barras dos dois grupos, maior a chance de utilizar com sucesso essa característica para distinguir as duas classes. Pode-se observar que a potência do quinto nível de detalhes apresenta a menor sobreposição.

Face aos objetivos de desenvolver um método classificador, buscou-se avaliar os gráficos de dispersão das duas classes para cada parâmetro envolvido, de forma a encontrar a relação entre eles e visualizar uma possível separação entre os grupos, conforme mostra a Figura 51.

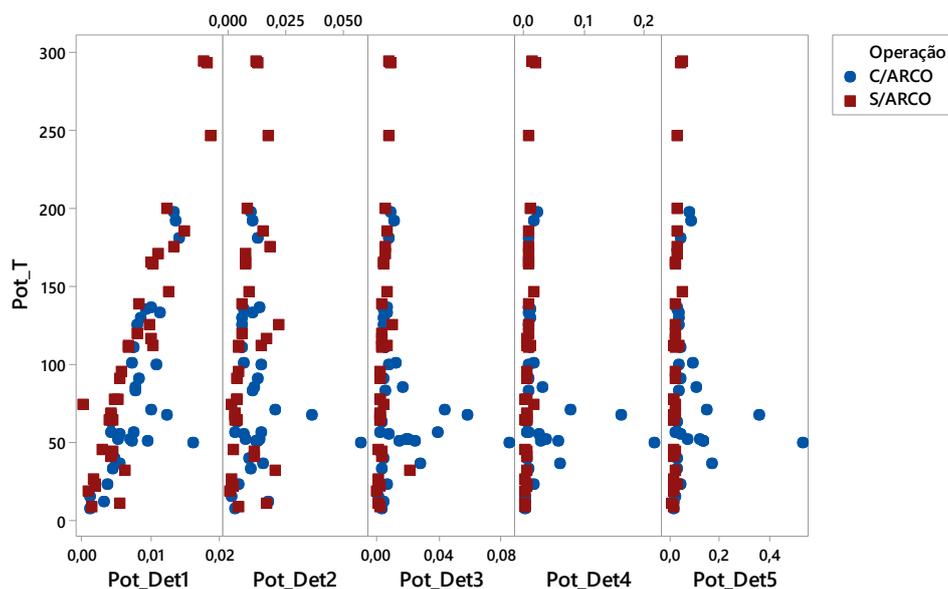
Figura 51 - Matriz de dispersão de todos os fatores envolvidos.



Fonte: elaborado pelo autor.

No gráfico da matriz de dispersão é possível visualizar a interação entre todos os fatores na condição com e sem arco. Com o objetivo de separar os dois grupos, pode-se destacar a linha mais acima da tabela que mostra a relação da potência do sinal da corrente de carga com cada um dos sinais dos detalhes nas condições com e sem arco. Essa primeira linha é destacada na Figura 52.

Figura 52 - Matriz de dispersão da potência do sinal vs potência dos detalhes.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na Figura 52, não fica evidente a possibilidade da separação entres os grupos de forma linear. Contudo, para verificar essa possibilidade, foi implementado na ferramenta Minitab um classificador pelo método da análise discriminante com os preditores escolhidos. A Tabela 10 mostra o resultado de um modelo classificador baseado na técnica da análise linear discriminante.

Tabela 10 - Análise linear discriminante para detecção do arco série.

Alocado no Grupo	c/arco	s/arco
C/arco	18	2
S/arco	15	35
Total de N	33	37
N correto	18	35
Proporção	0,545	0,946

A utilização da análise discriminante linear com os preditores escolhidos conseguiu um percentual de 75% de acerto, contudo, há de ser considerado que o classificador acertou somente 54% dos casos que possuíam o arco série. Por esse motivo essa metodologia foi descartada, sendo necessário algo mais sofisticado para uma detecção mais robusta, como por exemplo técnicas de aprendizagem de máquina.

Dentre suas potencialidades, a máquina de vetores de suporte (SVM) fornece um meio computacional eficiente para o aprendizado de bons hiperplanos de separação entre as classes.

4.4 DESEMPENHO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS

Após a extração dos dados através da Transformada Wavelet Daubechies Db10, com 5 níveis de decomposição, foram implementados 5 modelos diferentes (A, B, C, D e E) através da variação dos preditores utilizados (potência dos detalhes da decomposição) e a técnica de treinamento e validação (Ressubstituição, Holdout e VC k-fold).

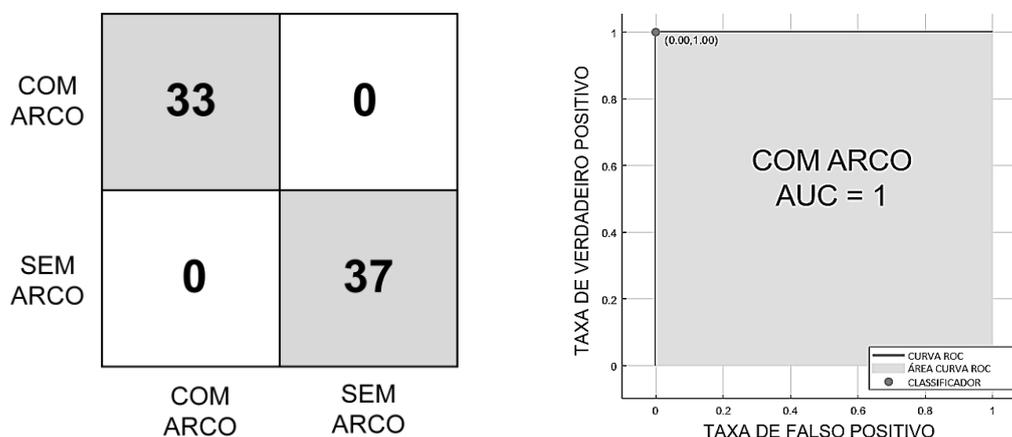
4.4.1 MODELO A (D3, D4 E D5) – RESUBSTITUIÇÃO

O Modelo A utilizou os detalhes d3, d4 e d5 e foi construído a partir da técnica de ressubstituição, ou seja, foram utilizados todos os dados na etapa de treinamento e todos os dados na etapa de teste e validação. Essa metodologia utiliza a maior quantidade de informações possíveis na etapa de treinamento, o que é um aspecto positivo. Contudo, para a etapa de teste e validação, caso não seja disponível uma base de dados externa, o resultado pode não ser confiável, dependendo do volume de dados utilizado no treinamento e a complexidade do processo em estudo.

Para essa etapa foram utilizadas as 70 medições e os 5 níveis de energia. Com base nesta avaliação foi possível identificar 100% das medidas de forma correta, 33

medidas com arco e 37 sem arco. A Figura 53 mostra a matriz de confusão e a curva ROC resultante do teste com tal modelo.

Figura 53 - Resultado do Modelo A.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base na Figura 53 consta-se o acerto de 100% na classificação das medidas disponíveis. Pode-se observar, ainda, a área sob a curva *ROC*, uma probabilidade de 100% para correta classificação da amostra.

Deve-se considerar que esses resultados estão sujeitos ao *overfitting*, ou seja, eles detectam perfeitamente o padrão ao qual eles conheceram na etapa de treinamento, contudo não há garantias que ele apresentará o mesmo desempenho para sinais externos. Por esse motivo o modelo foi testado com dados externos extraídos de (PATRICK; FRANCESCO, 2020). O resultado dos testes de classificação com esses sinais é apresentado na Tabela 11:

Tabela 11 - Teste com dados externos - Modelo A

	Descr. Carga	Valor Real	Resultado	Erro
Med. Externa 01	Cafeteira Dolce Gusto	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 02	Lâmpada Halógena	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 03	Chaleira Elétrica	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 04	Aspirador de pó 1200 W	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 05	Aspirador de pó 1250 W	COM ARCO	COM ARCO	-

Verificou-se que o modelo teve dificuldades de identificar dados externos, ou seja, apesar do alto percentual de acertos para os dados já conhecidos, ele não foi assertivo na identificação de dados externos: que não participaram da etapa de treinamento.

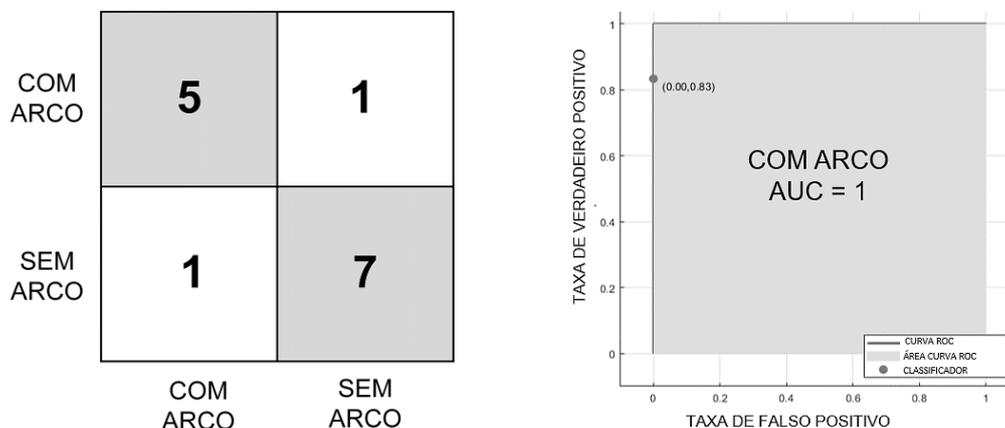
4.4.2 MODELO B (D3, D4 E D5) – HOLDOUT

Com objetivos de realizar uma avaliação mais criteriosa da implementação de um modelo preditor baseado na TW, foi desenvolvido um modelo com reserva de dados para validação (holdout). Dessa maneira uma parte das medições é utilizada para a etapa de treinamento e a outra é utilizada na etapa de teste e validação. Esse modelo tende a reproduzir de forma mais fidedigna o comportamento do sistema em resposta a dados não conhecidos. Normalmente essa técnica é utilizada quando há um volume de dados considerável.

A utilização dessa metodologia pode indicar se a quantidade de medições utilizadas foi insuficiente ou não. Estipulou-se uma divisão de 80% dos dados para treinamento e 20% para validação. A Figura 54 (esquerda) mostra a matriz de confusão obtida com o teste do modelo e as 14 medidas isoladas para utilização na validação. Com base na matriz de confusão o resultado da etapa de validação indica um percentual de acerto de 85%, 12 acertos em 14 das amostras que foram retiradas da etapa de validação

para serem utilizadas na etapa de testes. A figura 54 (direita) mostra a área sob a curva ROC =1.

Figura 54 - Resultado do Modelo B.



Fonte: elaborado pelo autor.

Verifica-se dessa forma que o nível de *accuracy* cai em relação ao processo sem proteção contra *overfitting*. Contudo, esse resultado traz maior confiabilidade com relação aos dados externos em futuras aplicações.

Esse modelo também foi avaliado com relação aos dados externos obtidos de (PATRICK; FRANCESCO, 2020). A Tabela 12 mostra o resultado dos testes do modelo desenvolvido com a metodologia *hold out*.

Tabela 12 - Teste com dados externos – Modelo B

	Descr. Carga	Valor Real	Resultado	Erro
Med. Externa 01	Cafeteira Dolce Gusto	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 02	Lâmpada Halógena	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 03	Chaleira Elétrica	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 04	Aspirador de pó 1200 W	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 05	Aspirador de pó 1250 W	COM ARCO	COM ARCO	-

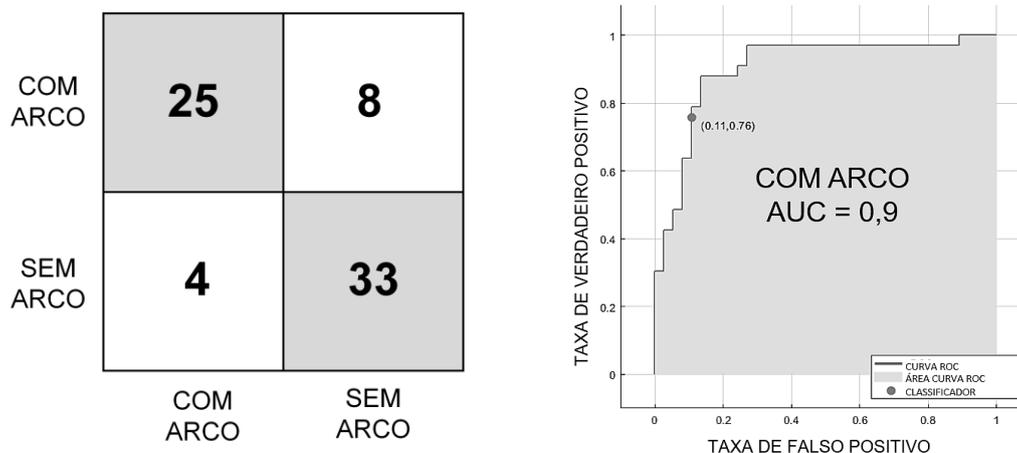
Apesar da redução do desempenho global, quando comparado ao modelo sem validação, observou-se uma melhora na classificação de dados externos, um dos focos do modelo proposto. Contudo, esse procedimento requer um volume maior de dados. Para os casos com limitação no número de medições é recomendada a metodologia baseada na Validação Cruzada *K-fold* (WLODARCZAK, 2019).

4.4.3 MODELO C (D3, D4 E D5) – VALIDAÇÃO CRUZADA (CV) K-FOLD

O modelo baseado no treinamento baseado na validação cruzada *k-fold*, ou do inglês, *k-fold cross-validation*, é o mais recomendado quando não há um volume significativo de dados disponíveis. Para a amostra, 70 ensaios, o parâmetro *K* foi definido como 5, ou seja, cinco etapas de treinamento e validação na proporção 80% de treino e 20% de validação. Os parâmetros de ajustes do modelo final tomam como referência o erro acumulado de cada ciclo de treinamento.

A Figura 55 (esquerda) mostra uma precisão de 83%, a mais baixa dos três modelos analisados. Destaca-se que essa é a opção mais conservadora e, conseqüentemente, com maior confiabilidade, podendo ser traduzida como o limite possível para o modelo com os dados disponíveis. A figura 55 (direita) mostra também a área sob a curva ROC de 0.9.

Figura 55 - Resultado do Modelo C.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 13 sumariza o resultado da validação com dados externos. Observa-se que não houve melhoria na correta classificação quando comparado ao modelo com reserva de validação. Isso indica que para uma melhoria no modelo seriam necessários mais dados na etapa de treinamento.

Tabela 13 - Teste com dados externos – Modelo C

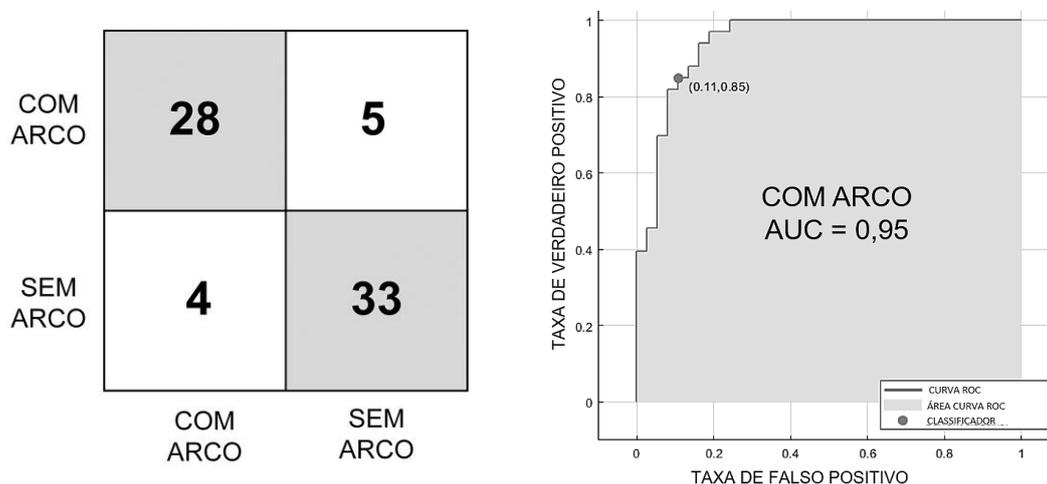
	Descr. Carga	Valor Real	Resultado	Erro
Med. Externa 01	Cafeteira Dolce Gusto	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 02	Lâmpada Halógena	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 03	Chaleira Elétrica	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 04	Aspirador de pó 1200 W	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 05	Aspirador de pó 1250 W	COM ARCO	COM ARCO	-

Apesar de aparentemente ter havido uma piora nos indicadores de desempenho, pode-se afirmar que o modelo gerado por essa metodologia teve um desempenho melhor nos testes com os dados externos.

4.4.4 MODELO D (D5) – VALIDAÇÃO CRUZADA (CV) K-FOLD

Com base nessa metodologia, foi desenvolvido um modelo utilizando apenas o primeiro nível de detalhes da transformada wavelet para avaliar o impacto na capacidade de classificar o estado de funcionamento das cargas. Foram utilizadas as 70 médias, porém apenas a potência do sinal e a potência do quinto nível de detalhe *d5* foram consideradas como preditores. Conforme indica a matriz de confusão e a *AUROC*, mostrada na Figura 56, esse modelo apresentou um melhor resultado.

Figura 56 - Resultado do Modelo D.



Fonte: elaborado pelo autor.

A *accuracy* alcançada foi de 0,87 e a AUROC 0,95. O resultado mostra que a utilização apenas do detalhe *d5* como parâmetro traz um melhor resultado geral para o modelo, considerando os dados dos ensaios realizados.

Apesar dessa melhoria, observa-se que o percentual de acerto para os dados externos diminuiu, indicando que para esses dados, os demais níveis são mais sensíveis. Esse modelo foi capaz de classificar corretamente apenas dois dos cinco sinais com arco, conforme pode-se observar na Tabela 14:

Tabela 14 - Teste com apenas $d5$ – Modelo D

	Descr. Carga	Valor Real	Resultado	Erro
Med. Externa 01	Cafeteira Dolce Gusto	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 02	Lâmpada Halógena	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 03	Chaleira Elétrica	COM ARCO	COM ARCO	Tipo I
Med. Externa 04	Aspirador de pó 1200 W	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 05	Aspirador de pó 1250 W	COM ARCO	COM ARCO	-

A diminuição do número de preditores melhorou o desempenho para os dados que foram ensaiados, porém reduziu a capacidade de classificação dos dados externos. Isso indica que, o sucesso na detecção de arco com base nesses dados, pode estar associado a outros níveis de detalhes, além de $d5$, incluindo os detalhes $d1$ e $d2$, inicialmente desconsiderados em função da análise do gráfico de variação do valor da potência dos detalhes.

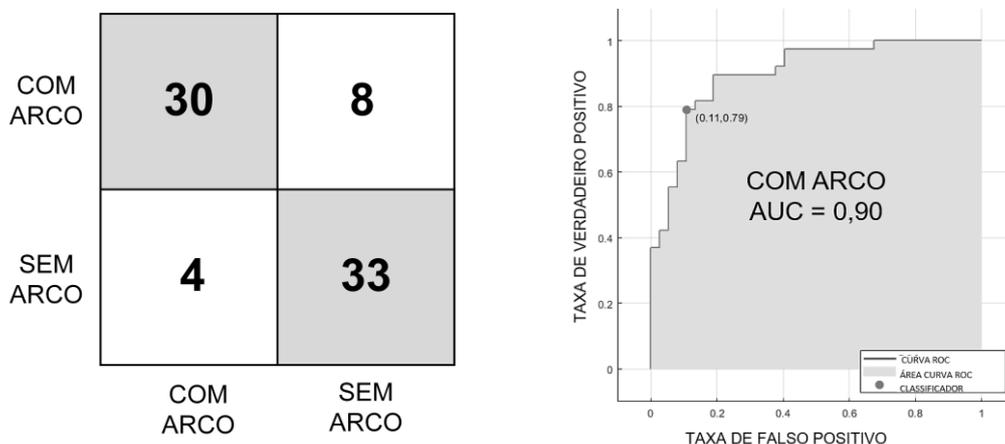
4.4.5 MODELO E (D1, D2, D3, D4, D5) + DADOS EXTERNOS – VALIDAÇÃO CRUZADA K-FOLD

Quanto mais abrangente é o volume de dados sobre o fenômeno que se pretende prever, maior as chances de construção de um modelo robusto. Contudo, na prática, existem limitações no número de ensaios, e no estudo em questão, 70 experimentos foram realizados. Os resultados obtidos foram satisfatórios, contudo, a inclusão de novas informações na etapa de treinamento pode, em tese, gerar um modelo com maior accuracy.

Para esse modelo foram consideradas 75 medidas: 70 medições realizadas e 5 medidas externas. Para este conjunto de dados os 5 níveis de detalhe da TW foram

avaliados. Para evitar *overfitting* o modelo de validação cruzada *k-fold* foi utilizado. A avaliação do desempenho desse modelo pode ser vista na Figura 57:

Figura 57 - Teste do Modelo E.



Fonte: elaborado pelo autor.

O modelo atingiu 84% de *accuracy* e 0.9 com a *AUROC*. Ainda que o resultado global tenha ficado abaixo do resultado anterior, que atingiu 95% de probabilidade de classificar corretamente o sinal contra 90% desse modelo, obteve-se o melhor resultado com os dados externos. 4 de 5 medições externas foram classificados corretamente, conforme resultados sumarizados na Tabela 15.

Tabela 15 - Teste do com os dados externos e os 5 níveis de detalhes - Modelo E.

	Descr. Carga	Valor Real	Resultado	Erro
Med. Externa 01	Cafeteira Dolce Gusto	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 02	Lâmpada Halógena	COM ARCO	SEM ARCO	Tipo I
Med. Externa 03	Chaleira Elétrica	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 04	Aspirador de pó 1200 W	COM ARCO	COM ARCO	-
Med. Externa 05	Aspirador de pó 1250 W	COM ARCO	COM ARCO	-

Observa-se que de acordo com a metodologia de construção do modelo preditor e a técnica de validação os resultados podem apresentar grande variação. A Tabela 16

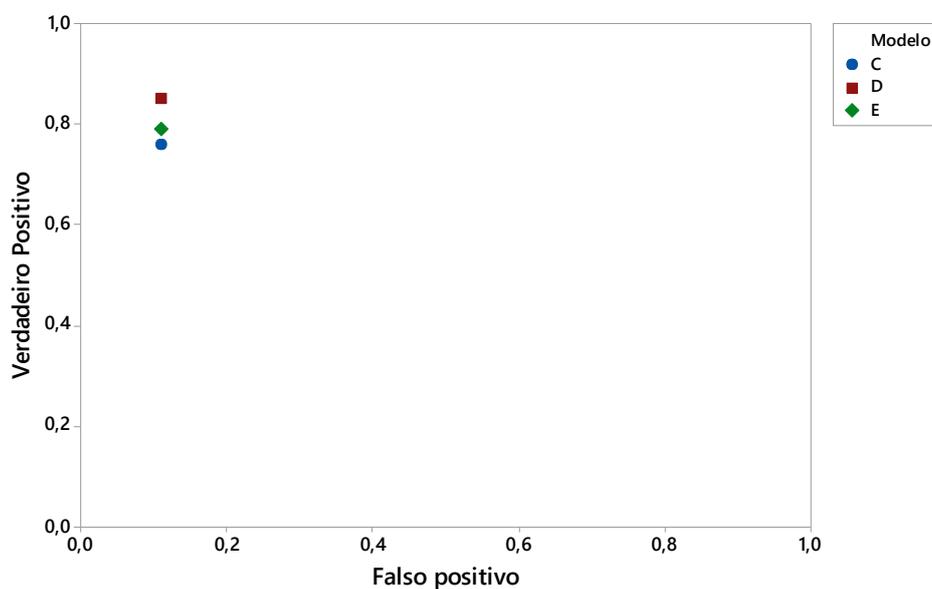
sumariza os resultados obtidos com cada um dos modelos. A coluna “Teste dados Ext.” corresponde à *accuracy* obtida com o modelo na classificação dos 5 sinais externos.

Tabela 16 - Validação dos modelos classificadores.

Modelo	Método de validação	Dados Trein.	Dados Testes	ACC	AUROC	Quantidade. de Níveis de detalhe	Teste dados Ext.	Prot. <i>Overfitting</i>
A	<i>Resubstitution</i>	70	70	1	1	3	0,4	SEM
B	<i>Holdout</i> de (20%)	56	14	0,85	1	3	0,4	BAIXA
C	cruzada <i>k-fold</i>	70	70	0,83	0,9	3	0,6	ALTA
D	Cruzada <i>k-fold</i> (apenas <i>d5</i>)	70	70	0,87	0.95	1	0,4	ALTA
E	Cruzada <i>k-fold</i> (com dados externos)	75	75	0,84	0,9	5	0,8	ALTA

Analisando-se Tabela 16 verifica-se que através da SVM, considerando os mesmos dados, pode-se ter resultados significativamente diferentes. Há de ser considerado, portanto, os pontos positivos e negativos de cada um dos modelos. Na prática, busca-se um modelo que seja capaz de classificar corretamente qualquer sinal, por isso a proteção contra *overfitting* é um quesito importante. Nesse sentido, foram considerados apenas os modelos baseados em validação cruzada, que são os modelos C, D e E. Observando os pontos da curva *ROC* mostrados na Figura 58 pode-se observar que o modelo D apresenta uma taxa de verdadeiro positivo (VP) maior que seus pares e a mesma taxa de falso positivo (FP), não havendo, portanto, dúvidas com relação ao melhor desempenho considerando os dados obtidos nos ensaios.

Figura 58 - Pontos da curva ROC dos modelos com validação cruzada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Ao levar-se em conta os dados de validação externos, verifica-se uma melhora significativa na accuracy, 80% do modelo E contra 40% dos modelos C e D, conforme mostrado na coluna “Testes dados externos” da Tabela 16.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Este capítulo apresentou os resultados obtidos na detecção da falta arco com a utilização do valor da potência do sinal de corrente de carga e o sinal de detalhe da TW. A implementação desses parâmetros na construção de um modelo classificador mostrou-se bastante satisfatório.

A variabilidade das cargas e a metodologia de validação tem grande impacto nos valores obtidos de *accuracy* e *AUROC*. Os resultados indicam também que a metodologia, por ora, pode apresentar limitações quanto a sensibilidade, no que diz respeito à potência da carga. A única carga que não foi capaz de ser corretamente

classificada por nenhum modelo foi a de uma luminária, visto que sua potência é a mais baixa dentre todas as cargas consideradas (3,75 W), o que pode explicar a dificuldade na identificação da ocorrência do arco elétrico tipo série.

Observa-se que a inclusão de novos dados (ensaios externos) na etapa de treinamento impacta significativamente na capacidade de generalização do modelo, como demonstrado na construção do modelo *E*. Fica evidenciada a capacidade de melhora do modelo a partir de uma base de dados com uma variabilidade de cargas ainda maior e obtidos a partir de diferentes formas de geração da falta arco, como a falta arco por caminho carbonizado.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou um estudo sobre a falta arco tipo série através de ensaios experimentais com a obtenção dos sinais de corrente de cargas com e sem a presença do arco. A partir da análise dos sinais obtidos foi possível extrair parâmetros capazes de sinalizar a presença do fenômeno e aplicá-los na construção de um modelo classificador *SVM*. Dentre as ambições desta pesquisa, destaca-se a idealização de um estudo abrangente a fim de identificar um método robusto capaz de indicar a presença do arco.

A metodologia proposta, a qual fundamentou-se no uso da Transformada Wavelet é combinada com a aplicação de um modelo classificador baseado em aprendizagem supervisionada de máquina. Os resultados obtidos demonstram que o modelo foi capaz de classificar corretamente a presença da falta arco série de forma bastante satisfatória, mesmo para cargas com efeito de mascaramento.

Inicialmente cabe ressaltar algumas fragilidades das conclusões que serão apresentadas:

- A principal delas é o tamanho da amostra utilizada para a implementação do modelo. Foram realizadas apenas 70 medidas em função de limitações de tempo. Mesmo com relativamente baixo de medições, optou-se por não ampliar de forma artificial a base de dados (simulação, variações estatísticas), desenvolvendo o modelo com uma base de dados de medidas reais;
- Não foram consideradas as incertezas oriundas da instrumentação utilizada. A utilização de um equipamento com resolução maior do que 8 bits poderiam ter contribuído com os resultados;

- Um projeto de experimentos do tipo fatorial completo poderia indicar de forma matemática qual o melhor modelo inteligente construído;

No que tange a instrumentação envolvida na aquisição da corrente elétrica, a frequência de amostragem de 40 kHz mostrou ser suficiente para o processamento do sinal, não sendo necessário, portanto, transdutores de alta frequência para a correta identificação do fenômeno.

Quanto ao uso da técnica de decomposição multiresolução escolhida, a consideração da potência dos sinais de detalhamento da TW conduziu a resultados satisfatórios para a identificação da falta arco, mesmo em situações críticas de detecção. Na presença de cargas com potencial de camuflar os efeitos do arco série, o modelo classificador escolhido apresentou resultados satisfatórios para identificação da falta arco.

Baseado no uso de máquinas de vetor de suporte (*SVM*), na etapa de validação da metodologia, o modelo matemático classificador que apresentou o melhor desempenho obteve uma *accuracy* em torno de 90%.

Dentre os modelos desenvolvidos destaca-se o modelo D, que utilizou a validação cruzada, que fornece uma visão mais conservadora acerca do potencial de generalização. Este modelo alcançou a *ACC* mais alta, 87%, utilizando apenas o detalhe *d5* (623 a 1.250 Hz), *Db10*.

Por fim, constata-se que os experimentos realizados foram relativamente bem sucedidos, o método de decomposição multiresolução mostrou ser um extrator de dados adequado bem como o modelo classificador, *SVM*, conferiu atributos de generalidade a metodologia proposta.

De modo a fomentar avanços ao estado da arte balizados por esta pesquisa, cuja o tema não se esgotou, são sugeridos pontos de investigação para trabalhos futuros.

- Aumentar o número de amostras através de nova medições e métodos estatísticos de modo a constituir uma base de dados mais robusta para a construção do modelo inteligente.
- Com base neste trabalho, implementar um Projeto de Experimentos completo de forma a validar estatisticamente os resultados obtidos neste estudo.
- Realizar novas medições utilizando um equipamento para aquisição do sinal com resolução maior que 8 bits, como o utilizado neste trabalho.
- Além da implantação em dispositivos *AFDI*, a metodologia apresenta potencial para aplicação em inspeções periódicas em instalações elétricas. Como o parâmetro de classificação não é relacionado ao monitoramento da variação de determinada grandeza, a classificação do estado de operação do circuito pode ser determinada através de uma amostra pontual, sem a necessidade de monitoramento contínuo. Dessa maneira, mostra-se plausível o fomento a estudos com foco na normatização de um ensaio que indique um possível dano em um cabo elétrico em determinado circuito, antes de haver qualquer prejuízo significativo à instalação.
- A complementação deste trabalho com o incremento de ensaios realizados com a utilização do gerador de arco por caminhos carbonizados, conforme norma UL 1699, pode aumentar o poder de generalização do modelo atual. Constatou-se que o modelo de classificação considerando os dados externos, estes obtidos com gerador de arco por caminhos carbonizados, apresentou um bom desempenho na identificação do distúrbio. Todavia, de acordo com a Tabela 16 o melhor desempenho foi alcançado com a

utilização dos 5 sinais de detalhes $d1$, $d2$, $d3$, $d4$ e $d5$, diferentemente do que ocorrer na validação com somente os dados dos ensaios. Isso indica que este tipo de arco pode conter características distintas do arco gerado pelo protótipo construído.

REFERÊNCIAS

- ANDREA, J. *et al.* THE ELECTRIC ARC AS A CIRCUIT COMPONENT. *In:* , 2015. **IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S. l.]: IEEE, 2015. p. 003027–003034. Available at: <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392564>
- ARTALE, G. *et al.* EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF SERIES ARC FAULTS IN AC AND DC ELECTRICAL CIRCUITS. *In:* , 2014. **2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings**. [S. l.]: IEEE, 2014. p. 1015–1020. Available at: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860896>
- ASFANI, D. A. CHARACTERISTIC ANALYSIS OF LOW VOLTAGE ARCING CURRENT CONSIDERING SHORT CIRCUIT IMPEDANCE. **International Journal of Electrical and Electronics Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 7–12, 2016.
- AWWALU, J. On Holdout and Cross Validation: A Comparison between Neural Network and Support Vector Machine. **International Journal of Trend in Research and Development**, [s. l.], v. 6, n. April, 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/332350661_On_Holdout_and_Cross_Validation_on_A_Comparison_between_Neural_Network_and_Support_Vector_Machine
- BARANAUSKAS, J. A.; MONARD, M. C. **Reviewing Some Machine Learning Concepts and Methods** *Relatórios Técnicos do ICMC*. [S. l.: s. n.], 2000.
- BERRAR, D. Cross-validation. **Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics**, [s. l.], v. 1–3, n. January 2018, p. 542–545, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X>
- FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, [s. l.], v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- HADZIEFENDIC, N.; TRIFUNOVIC, J.; KOSTIC, M. EFFECTS OF A REDUCED TORQUE ON HEATING OF ELECTRICAL CONTACTS IN PLUGS AND RECEPTACLES. **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 8, n. 11, p. 1905–1913, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2827080>
- HAMEL, L. **Knowledge Discovery With Support Vector Machines**. [S. l.: s. n.], 2009.
- HAYKIN, S. **Neural Networks and Learning Machines**. 3th. ed. Ontario: [s. n.], 2009.

HONGKUN, Z.; TAO, C.; WENJUN, L. ARC FAULT SIGNATURES DETECTION ON AIRCRAFT WIRING SYSTEM. **Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)**, [s. l.], v. 2, p. 5548–5552, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2006.1714135>

KIM, J. C. *et al.* SERIES AC ARC FAULT DETECTION USING ONLY VOLTAGE WAVEFORMS. *In:* , 2019. **2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. [S. l.]: IEEE, 2019. p. 2385–2389. Available at: <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8721892>

LAZKANO, A. *et al.* EVALUATION OF A NEW PROPOSAL FOR AN ARCING FAULT DETECTION METHOD BASED ON WAVELET PACKET ANALYSIS. **European Transactions on Electrical Power**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 161–174, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1002/etep.13>

LORENA, A. C.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Uma Introdução às Support Vector Machines. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, [s. l.], v. XIV, p. 44–67, 2007.

LU, Q. *et al.* A NEW SERIES ARC FAULT IDENTIFICATION METHOD BASED ON WAVELET TRANSFORM. *In:* , 2017. **IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S. l.]: IEEE, 2017. p. 4817–4822. Available at: <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216831>

MALEKI, F. *et al.* Machine Learning Algorithm Validation: From Essentials to Advanced Applications and Implications for Regulatory Certification and Deployment. **Neuroimaging Clinics of North America**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 433–445, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nic.2020.08.004>

MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing**. [S. l.]: Elsevier Inc., 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>

MARTEL, J.-M. **SERIES ARC FAULTS IN LOW-VOLTAGE AC ELECTRICAL INSTALLATIONS**. 205 f. 2018. - Ilmenau, [s. l.], 2018.

PATRICK, S.; FRANCESCO, F. **ARC FAULT DETECTION AND APPLIANCES CLASSIFICATION IN AC HOME ELECTRICAL NETWORKS USING RECURRENCE QUANTIFICATION PLOTS AND IMAGE ANALYSIS**. [S. l.], 2020. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3931688>. Acesso em: 12 fev. 2021.

PRESS, W. H. *et al.* **Numerical Recipes**. 3rd. ed. [S. l.]: Cambridge Press, 2007.

RESTREPO, C. E. ARC FAULT DETECTION AND DISCRIMINATION METHODS. *In:* , 2007. **Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts**. [S. l.]: IEEE, 2007. p. 115–122. Available at: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2007.4318203>

SHEA, J. J. CONDITIONS FOR SERIES ARCING PHENOMENA IN PVC WIRING. **IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 532–539, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2007.903500>

SIFUZZAMAN, M.; ISLAM, M. R.; ALI, M. Z. Application of Wavelet Transform and its Advantages Compared to Fourier Transform. **Journal of Physical Sciences**, [s. l.], v. 13, p. 121–134, 2009.

UNDERWRITERS LABORATORIES INC. **UL 1699 - ARC-FAULT CIRCUIT-INTERRUPTERS**. [S. l.: s. n.], 1999.

VU, H. D. *et al.* MULTI CRITERIA SERIES ARC FAULT DETECTION BASED ON SUPERVISED FEATURE SELECTION. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 113, n. December, p. 23–34, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.012>

WANG, Yangkun; ZHANG, F.; ZHANG, S. A NEW METHODOLOGY FOR IDENTIFYING ARC FAULT BY SPARSE REPRESENTATION AND NEURAL NETWORK. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. l.], v. 67, n. 11, p. 2526–2537, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2826878>

WANG, Yongxing *et al.* SIMULATION OF ARCING FAULT IN AIRCRAFT WIRING SYSTEM. *In:* , 2011. **2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology**. [S. l.]: IEEE, 2011. p. 582–585. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2011.6123058>

WLODARCZAK, P. **Machine Learning and its Applications**. [S. l.]: CRC Press, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1201/9780429448782>

WU, C. J.; LIU, Y. W.; HUNG, C. S. INTELLIGENT DETECTION OF SERIAL ARC FAULT ON LOW VOLTAGE POWER LINES. **Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 43–53, 2017. Available at: <https://doi.org/10.6119/JMST-016-1116-1>

YANG, K. *et al.* A NOVEL ARC FAULT DETECTOR FOR EARLY DETECTION OF ELECTRICAL FIRES. **Sensors**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 500, 2016. Available at: <https://doi.org/10.3390/s16040500>

YANG, S.; BERDINE, G. The receiver operating characteristic (ROC) curve. **The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles**, [s. l.], v. 5, n. 19, p. 34, 2017. Available at: <https://doi.org/10.12746/swrccc.v5i19.391>

YI, Y. *et al.* STUDY ON THE FAULT ARC ON-LINE DETECTING BASED ON WAVELET SINGULARITY DETECTION PRINCIPLE. *In:* , 2009. **2009 WASE International Conference on Information Engineering**. [S. l.]: IEEE, 2009. p. 151–154. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICIE.2009.130>

ZENODO. [S. l.], [s. d.]. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.60943>.

ZHI-TING, S.; LU, Y.; DI, H. DETECTION METHOD OF SERIES ARC FAULT BASED ON WAVELET TRANSFORM. *In:* , 2018. **2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)**. [S. l.]: IEEE, 2018. p. 1026–1030. Available at: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2018.8630636>

APÊNDICE 1 - Potência dos sinais e dos 5 níveis de detalhes da TW

Tabela 17 – Potência dos sinais dos sinais de detalhes das 70 medições

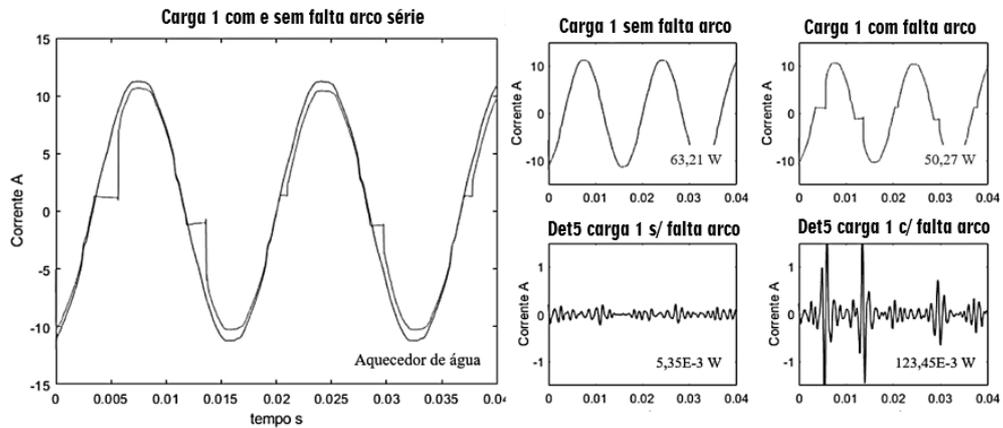
Carga	Pot. Sinal	Pot_d1	Pot_d2	Pot_d3	Pot_d4	Pot_d5	Operação
1	63,21930	0,00398	0,00268	0,00182	0,00424	0,00535	S/ARCO
2	50,27080	0,00722	0,01169	0,01388	0,02676	0,12345	C/ARCO
3	110,60240	0,00677	0,00457	0,00307	0,00816	0,01512	S/ARCO
4	85,24860	0,00771	0,01125	0,01659	0,03060	0,09458	C/ARCO
5	7,91720	0,00154	0,00430	0,00227	0,00092	0,00280	S/ARCO
6	7,47290	0,00128	0,00291	0,00322	0,00213	0,00521	C/ARCO
7	21,41250	0,00204	0,00229	0,00238	0,00593	0,00807	S/ARCO
8	21,42600	0,00205	0,00195	0,00212	0,00532	0,01518	C/ARCO
9	95,09830	0,00583	0,00390	0,00253	0,00425	0,00922	S/ARCO
10	40,21730	0,00430	0,01125	0,00281	0,00477	0,00817	S/ARCO
11	32,84944	0,00461	0,00974	0,00361	0,00646	0,02264	C/ARCO
12	145,87200	0,01279	0,00884	0,00680	0,01520	0,03996	S/ARCO
13	44,35830	0,00289	0,00189	0,00117	0,00163	0,00382	S/ARCO
14	36,11500	0,00548	0,01503	0,02771	0,06053	0,15980	C/ARCO
15	90,76280	0,00563	0,00374	0,00230	0,00481	0,00953	S/ARCO
16	66,74020	0,01248	0,03665	0,05725	0,16118	0,35050	C/ARCO
17	73,32310	0,00023	0,00145	0,00459	0,01495	0,01132	S/ARCO
18	48,89510	0,01621	0,05794	0,08390	0,21599	0,52252	C/ARCO
19	31,39720	0,00637	0,02063	0,02114	0,00476	0,01136	S/ARCO
20	55,51480	0,00768	0,01438	0,03933	0,00913	0,02000	C/ARCO
21	111,84590	0,00673	0,00455	0,00285	0,00487	0,00759	S/ARCO
22	70,82610	0,01023	0,02024	0,04383	0,07657	0,14205	C/ARCO
23	293,72020	0,01787	0,01213	0,00782	0,01371	0,03798	S/ARCO
24	191,82160	0,01366	0,01044	0,01098	0,01764	0,07755	C/ARCO
25	199,05210	0,01241	0,00840	0,00521	0,00966	0,01934	S/ARCO
26	135,45680	0,00944	0,00688	0,00459	0,00991	0,01883	C/ARCO
27	17,94920	0,00104	0,00071	0,00046	0,00122	0,00272	S/ARCO
28	14,36250	0,00109	0,00132	0,00120	0,00236	0,01074	C/ARCO

29	66,47270	0,00414	0,00279	0,00185	0,00357	0,00831	S/ARCO
30	51,17460	0,00710	0,01330	0,02011	0,03615	0,11144	C/ARCO
31	22,34230	0,00190	0,00135	0,00138	0,00548	0,02021	S/ARCO
32	119,95440	0,00818	0,00553	0,00359	0,00813	0,01501	S/ARCO
33	163,92500	0,01028	0,00711	0,00477	0,00812	0,01449	S/ARCO
34	124,48250	0,00811	0,00559	0,00446	0,00884	0,02585	C/ARCO
35	170,93200	0,01111	0,00764	0,00575	0,00755	0,01676	S/ARCO
36	129,57960	0,00870	0,00601	0,00491	0,01177	0,02781	C/ARCO
37	164,79710	0,01025	0,00716	0,00471	0,00701	0,01018	S/ARCO
38	110,35990	0,00758	0,00553	0,00511	0,01074	0,03580	C/ARCO
39	111,91290	0,01051	0,01462	0,00618	0,00961	0,02503	S/ARCO
40	82,71340	0,00789	0,01068	0,00555	0,00798	0,02828	C/ARCO
41	26,43100	0,00178	0,00143	0,00074	0,00106	0,00212	S/ARCO
42	22,26580	0,00374	0,00428	0,00709	0,01731	0,03555	C/ARCO
43	63,40680	0,00441	0,00316	0,00227	0,00257	0,00418	S/ARCO
44	54,42600	0,00551	0,00620	0,00808	0,02590	0,03157	C/ARCO
45	77,01650	0,00483	0,00346	0,00224	0,00299	0,00655	S/ARCO
46	62,83590	0,00417	0,00307	0,00284	0,00555	0,02266	C/ARCO
47	67,39630	0,00420	0,00287	0,00189	0,00427	0,00608	S/ARCO
48	51,04030	0,00528	0,00745	0,01924	0,02905	0,06027	C/ARCO
49	67,99020	0,00417	0,00285	0,00212	0,00516	0,00911	S/ARCO
50	49,98440	0,00951	0,01262	0,02429	0,05581	0,12655	C/ARCO
51	138,16810	0,00837	0,00569	0,00355	0,00627	0,00918	S/ARCO
52	100,22100	0,00731	0,00684	0,01194	0,01678	0,08459	C/ARCO
53	293,21610	0,01834	0,01243	0,00843	0,01790	0,03632	S/ARCO
54	197,33710	0,01346	0,00950	0,00837	0,02150	0,06904	C/ARCO
55	55,58340	0,00417	0,00296	0,00211	0,00395	0,01261	C/ARCO
56	125,34750	0,00990	0,02229	0,01039	0,00737	0,01466	S/ARCO
57	99,23480	0,01093	0,01391	0,00752	0,00903	0,02514	C/ARCO
58	76,73220	0,00518	0,00374	0,00232	0,00531	0,00788	S/ARCO
59	10,41760	0,00545	0,01675	0,00085	0,00052	0,00153	S/ARCO
60	10,93440	0,00328	0,01744	0,00382	0,00174	0,00457	C/ARCO
61	115,94700	0,01009	0,01636	0,00343	0,00602	0,01055	S/ARCO

62	90,47380	0,00830	0,01236	0,00435	0,00894	0,03090	C/ARCO
63	174,84470	0,01345	0,01842	0,00505	0,00703	0,01814	S/ARCO
64	136,40440	0,01018	0,01364	0,00606	0,00835	0,02193	C/ARCO
65	43,59380	0,00461	0,01140	0,00363	0,00615	0,01194	S/ARCO
66	39,66810	0,00468	0,00910	0,00393	0,00387	0,01662	C/ARCO
67	185,26560	0,01512	0,01516	0,00607	0,00738	0,01860	S/ARCO
68	132,48920	0,01146	0,01007	0,00713	0,00825	0,02710	C/ARCO
69	246,21130	0,01873	0,01697	0,00758	0,00805	0,02241	S/ARCO
70	180,64960	0,01426	0,01272	0,00724	0,00660	0,03578	C/ARCO

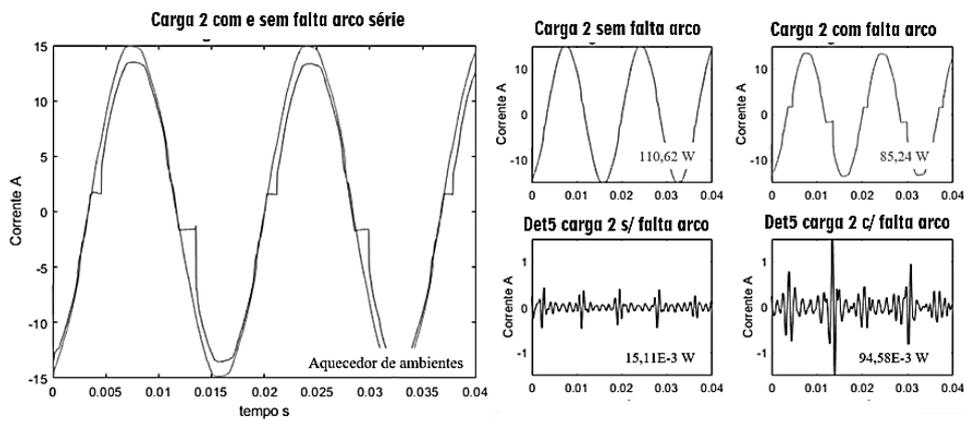
APÊNDICE 2 - Sinais de corrente com e sem arco das 37 cargas

Figura 1 - Corrente da Carga 1 (Aquecedor de Água 990 VA).



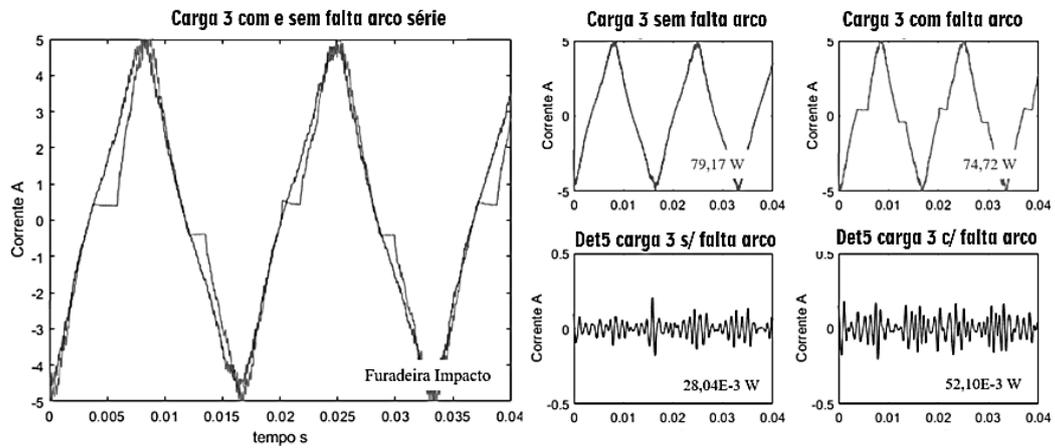
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 2 - Corrente da Carga 2 (Aquecedor de Ambientes 1281 VA).



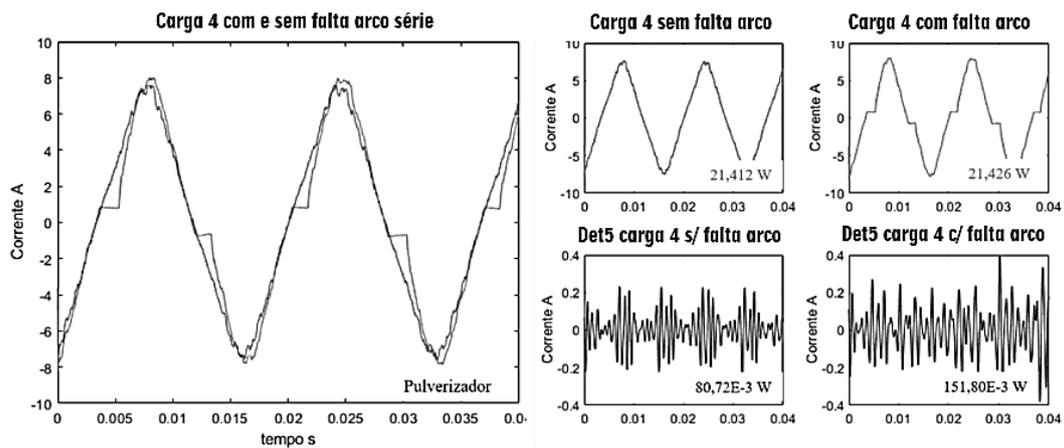
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 3 - Corrente da Carga 3 (Furadeira de Impacto 355 VA).



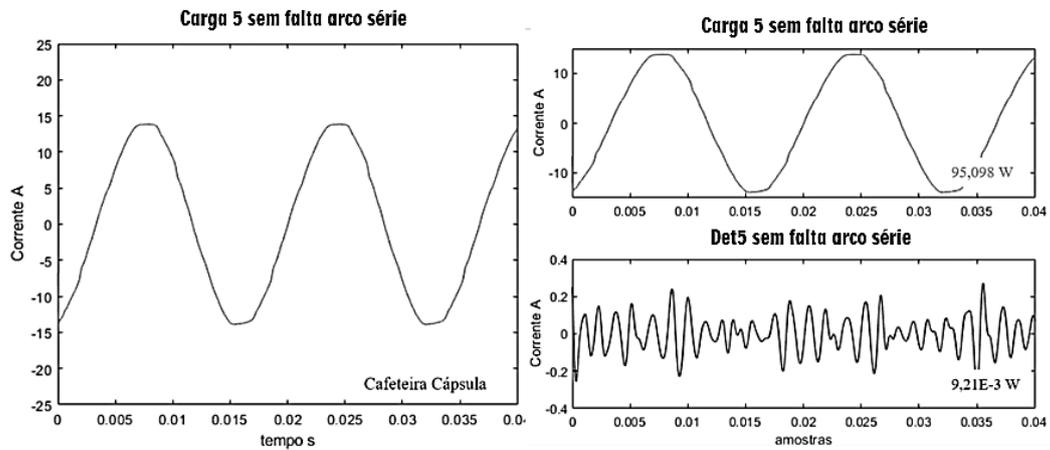
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 4 - Corrente da Carga 4 (Pulverizador 588 VA).



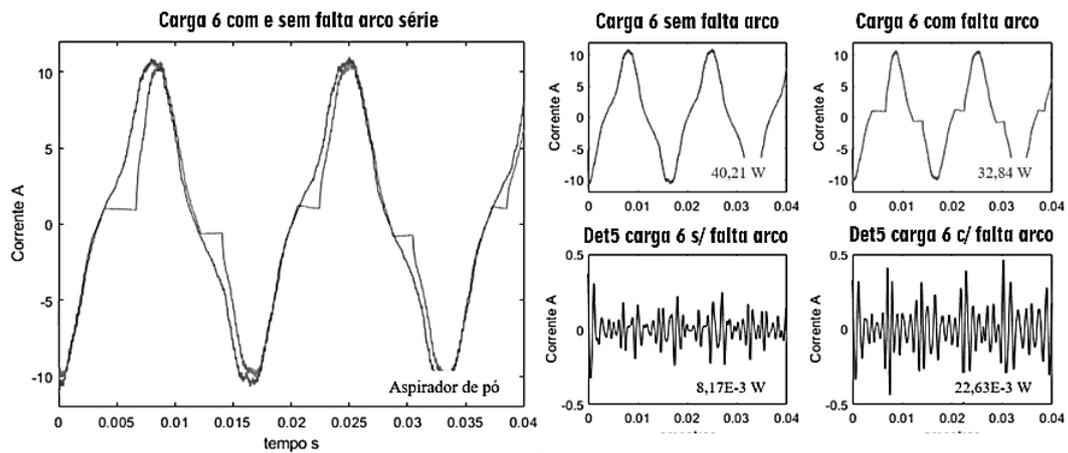
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 5 - Corrente da Carga 5 (Cafeteira de Cápsulas 1196 VA).



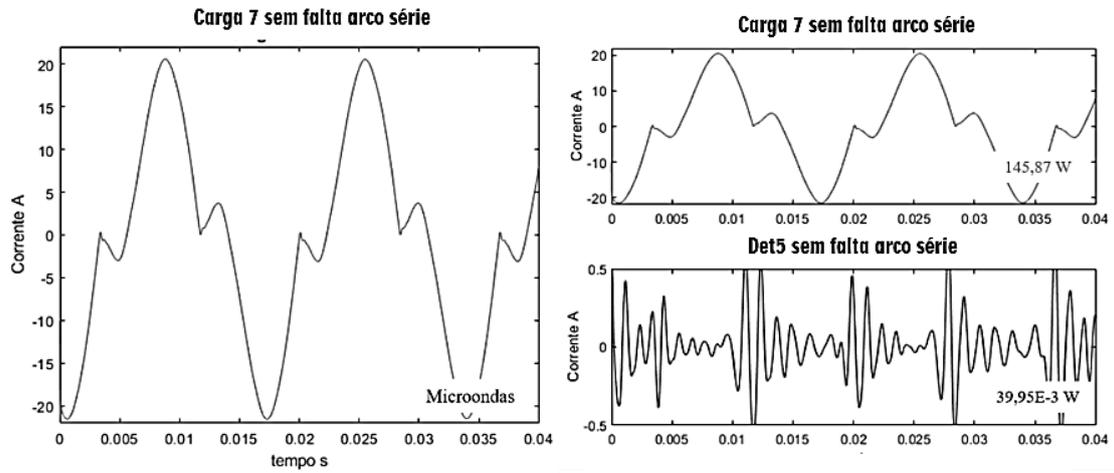
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 - Corrente da Carga 6 (Aspirador de Pó 800 VA).



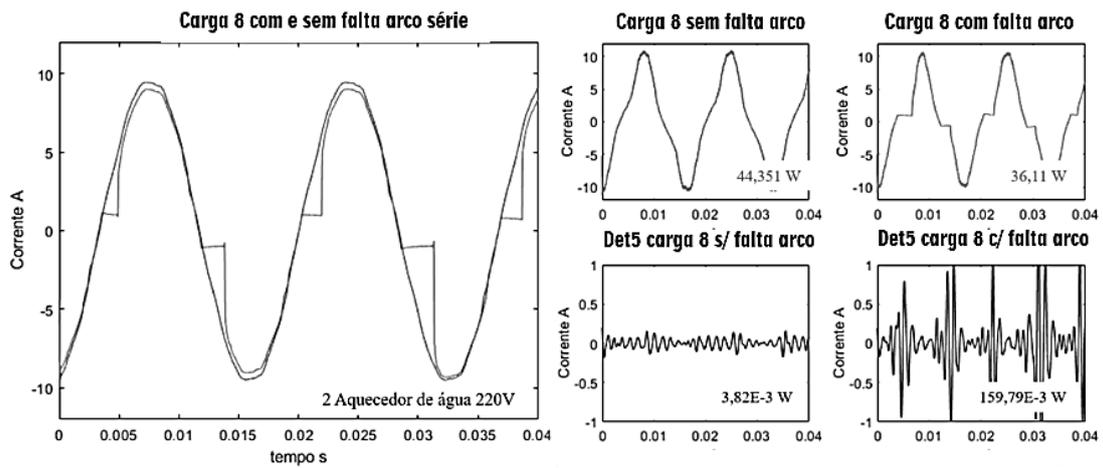
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 7 - Corrente da Carga 7 (Micro-ondas 1429VA).



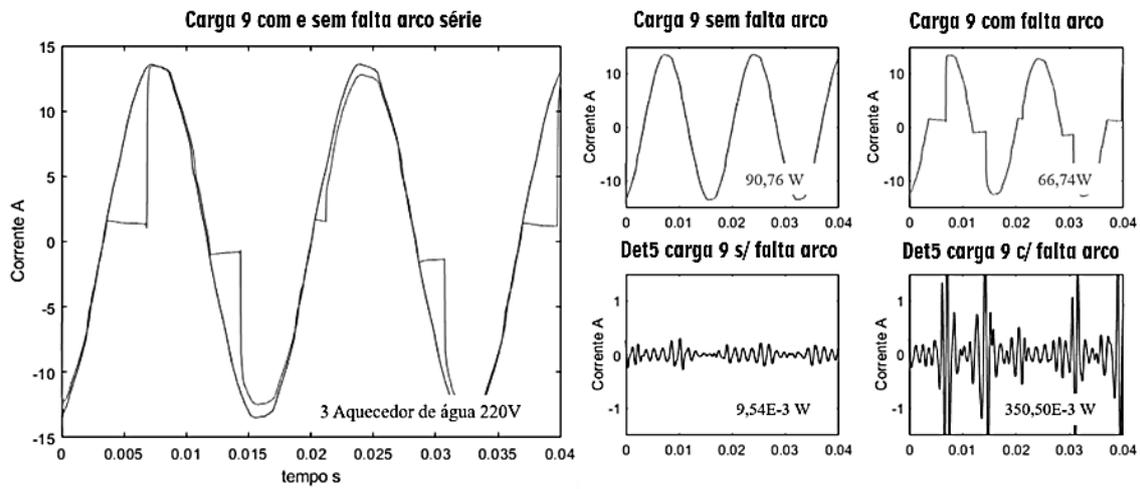
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8 - Corrente da Carga 8 (2 Aquecedores de Água 220V/1414VA).



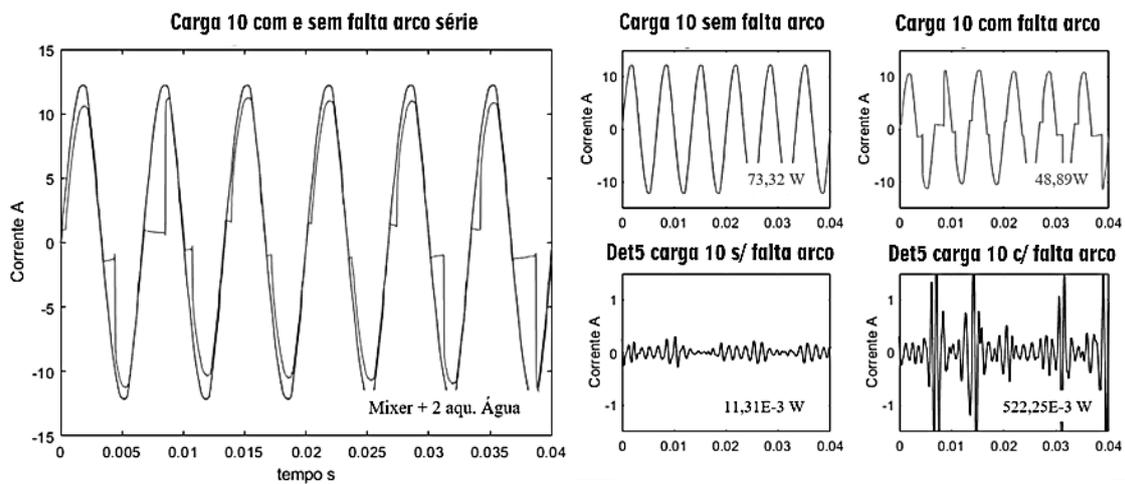
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9 - Corrente da Carga 9 (3 Aquecedores de Água 220V/1974VA).



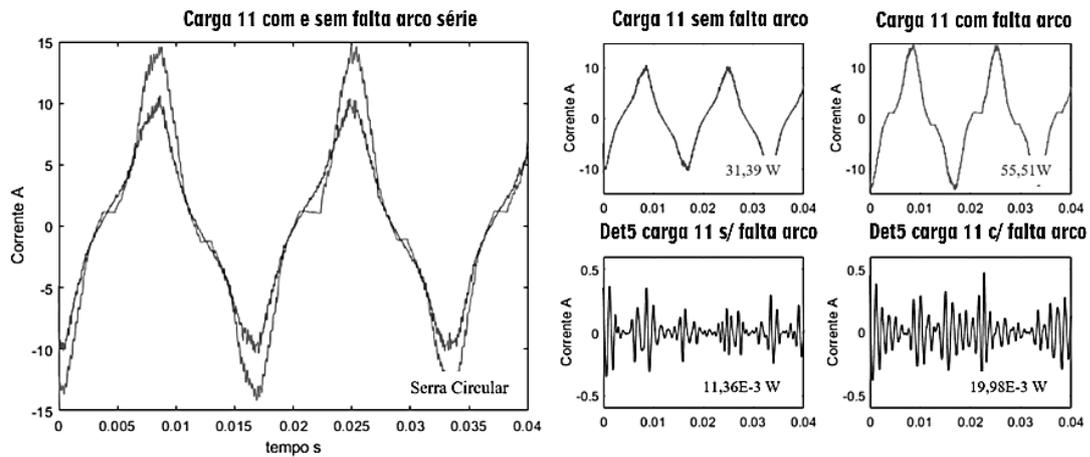
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 10 Corrente da Carga 10 (Mixer + 2 aq. Água 1030VA).



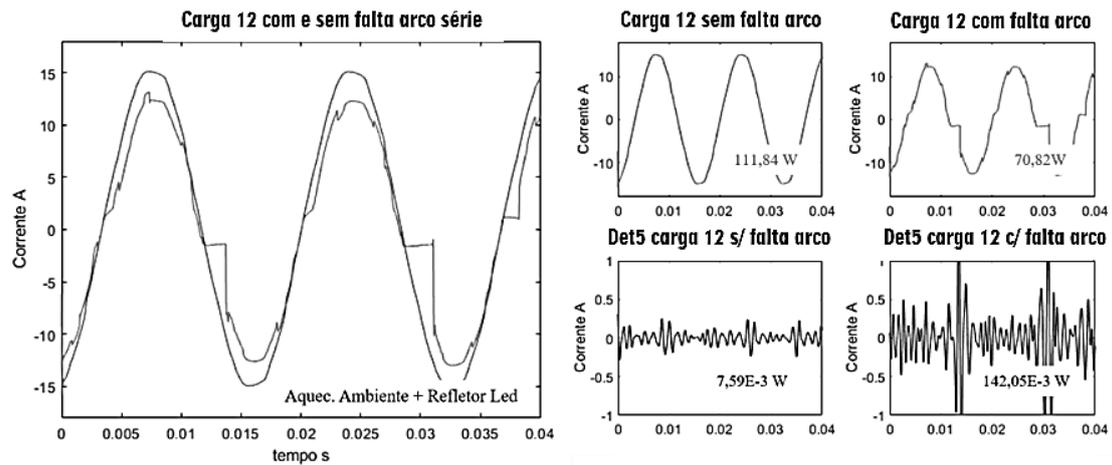
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 - Corrente da Carga 11 (Serra Circular 756VA).



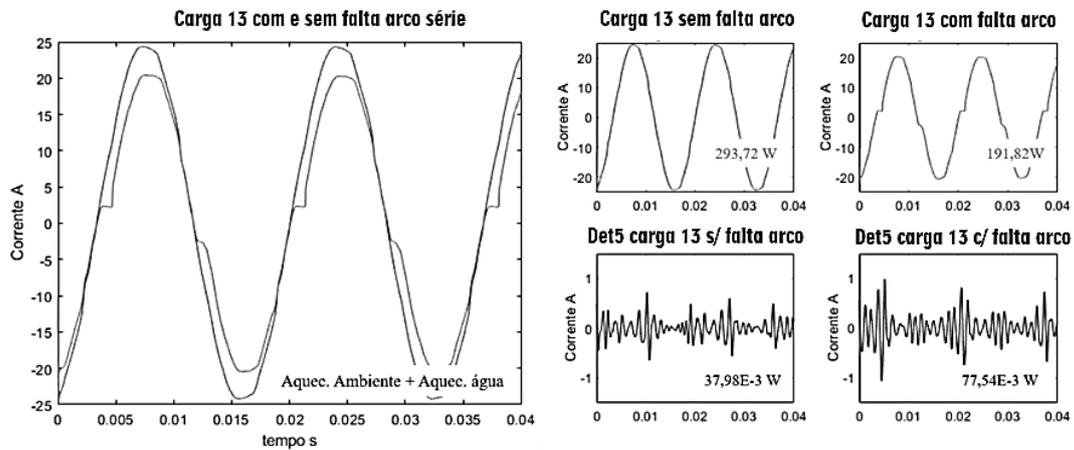
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 - Corrente da Carga 12 (Aq. Ambiente + Refletor Led 1291VA).



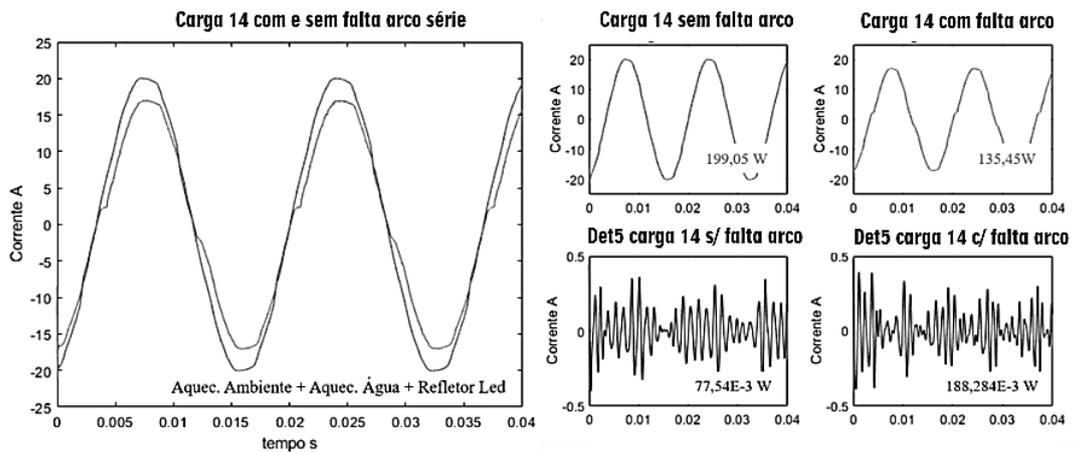
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 13 - Corrente da Carga 13 (Aqu. Ambiente + Aqu. Água 1983VA).



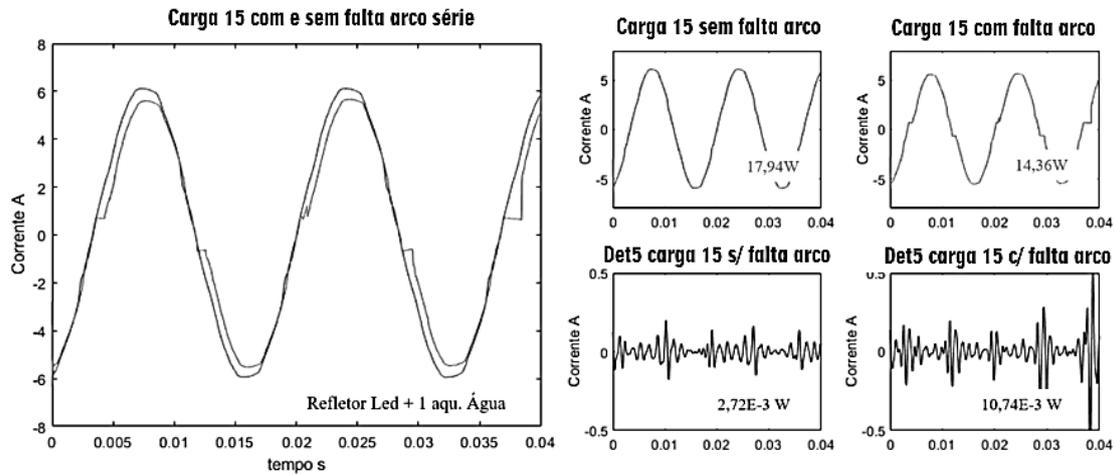
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 - Corrente da Carga 14 (Aqu. Ambiente + Aqu. Água + Refletor Led 1675 VA).



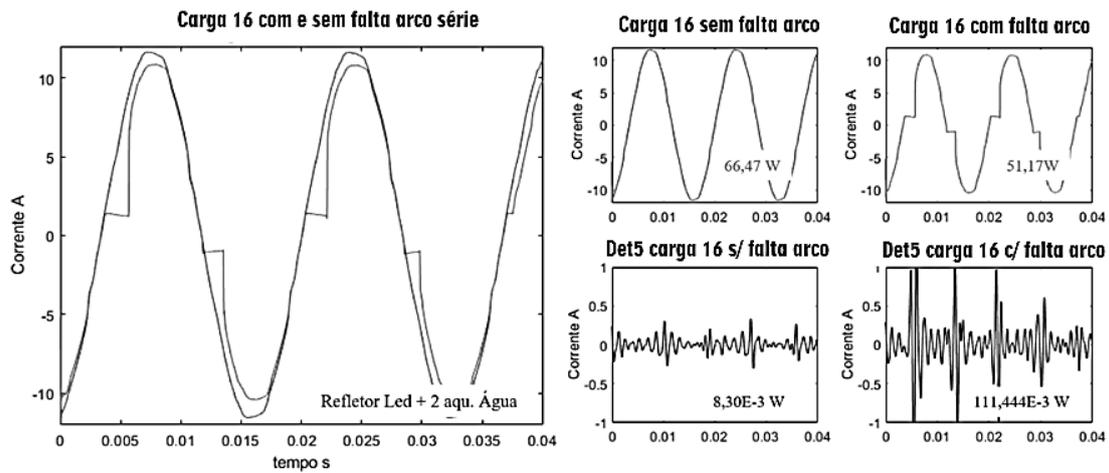
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 15 - Corrente da Carga 15 (Refletor Led + 1 Aqu. Água 532 VA).



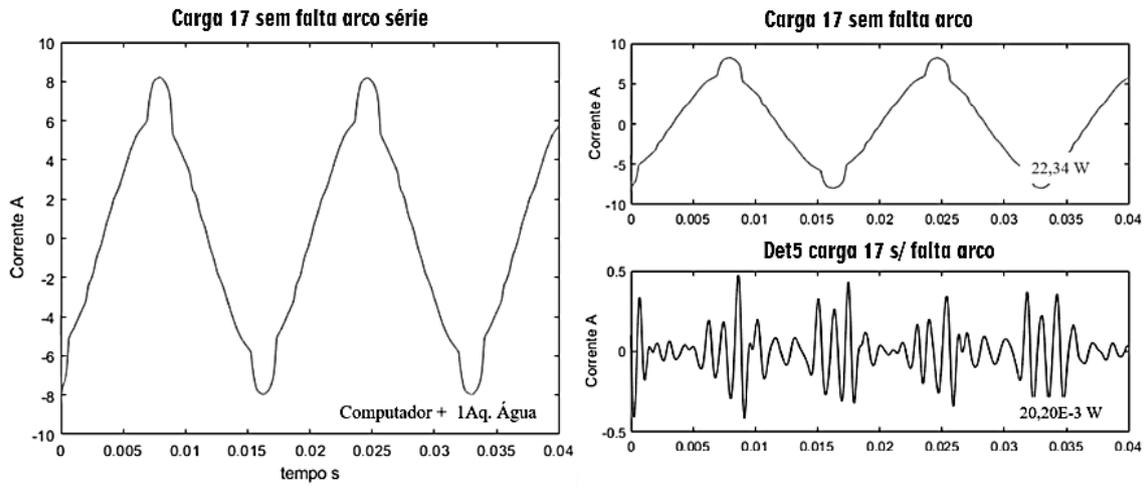
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16 - Corrente da Carga 16 (Refletor Led + 2 Aqu. Água 997 VA).



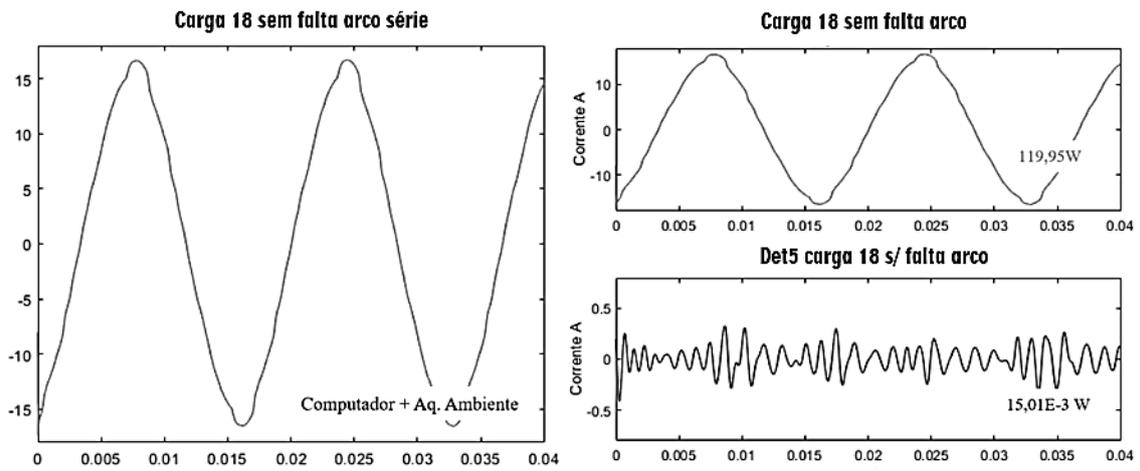
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 17 - Corrente da Carga 17 (Computador + 1 Aq. Água 599 VA).



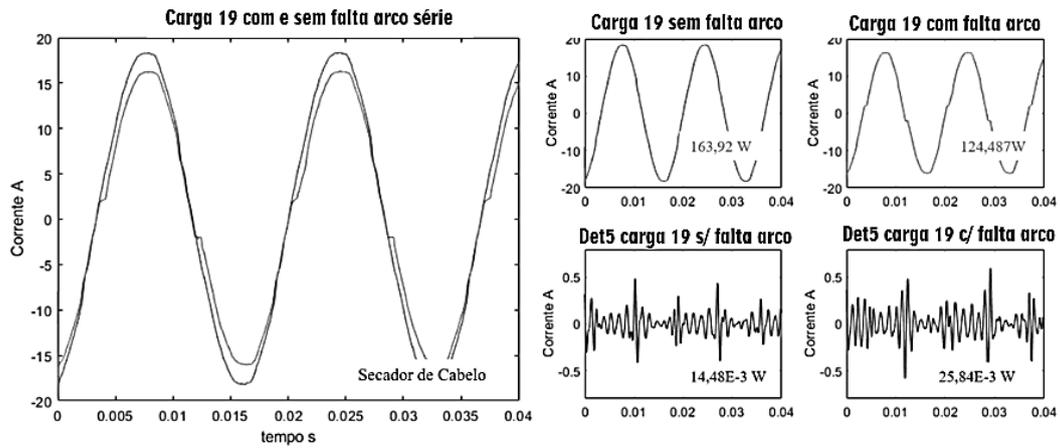
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 - Corrente da Carga 18 (Computador + Aq. Ambiente 1340VA).



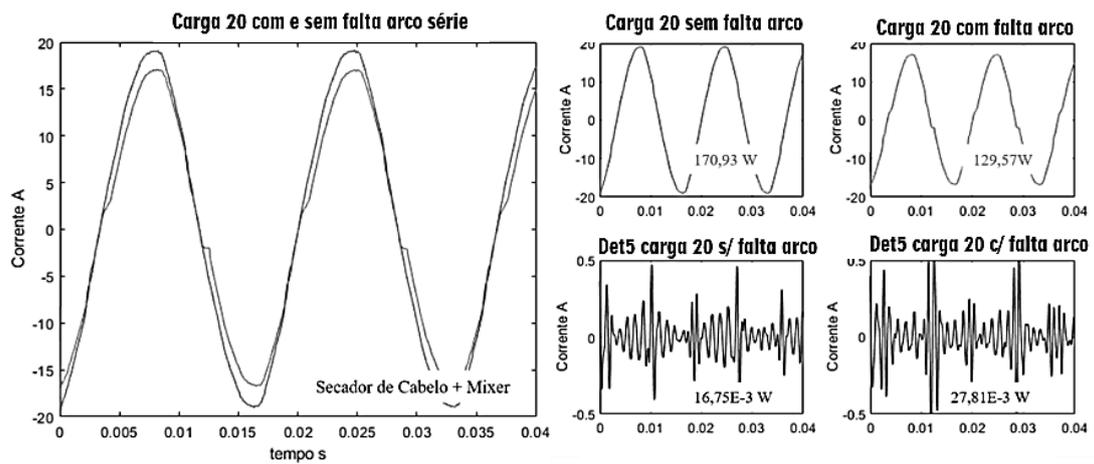
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 - Sinal de Corrente da Carga 19 – Secador de Cabelo 1535VA.



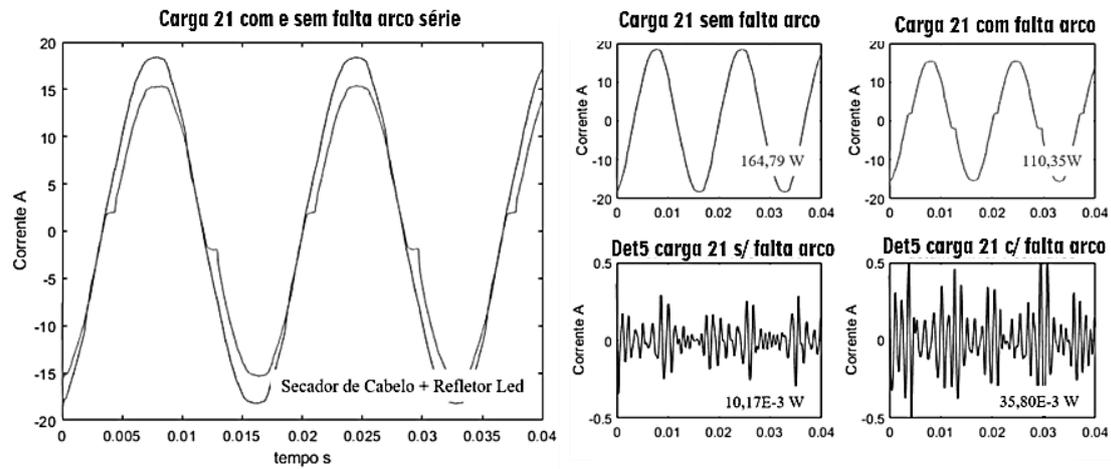
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 20 - Corrente da Carga 20 (Secador de Cabelo + Mixer 1526VA).



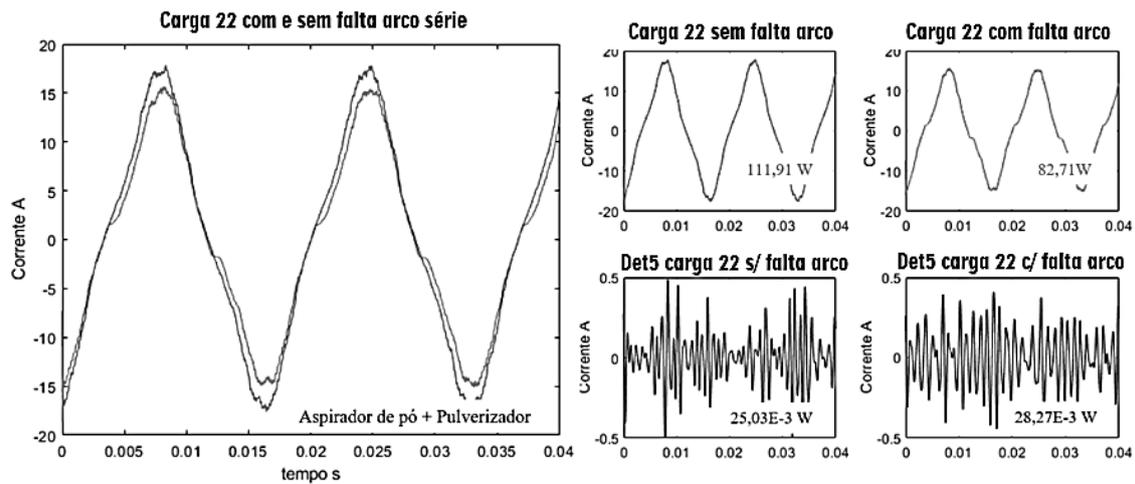
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 21 - Corrente da Carga 21 (Secador de Cabelo + Refletor Led 1355VA).



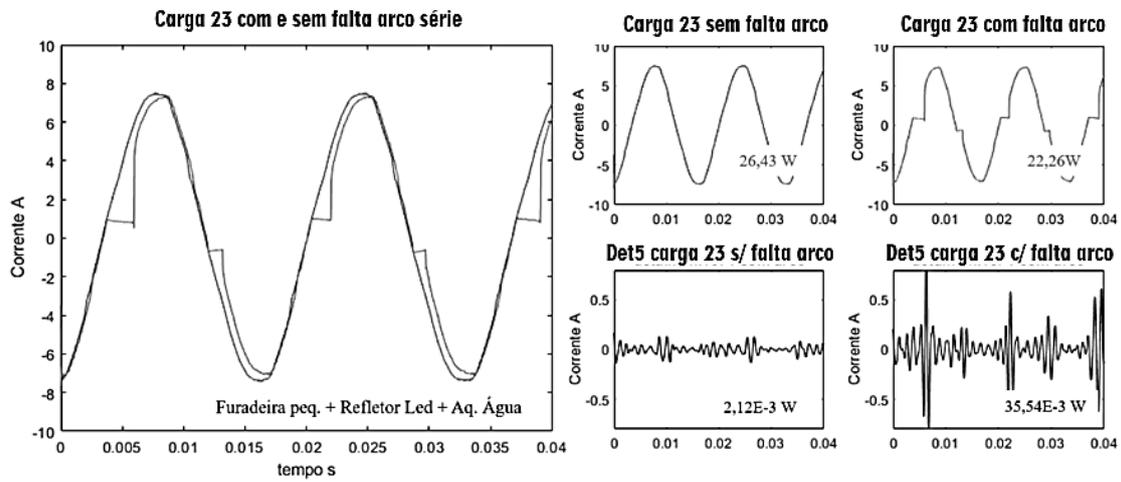
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22 - Corrente da Carga 22 (Aspirador de pó + Pulverizador 1272VA).



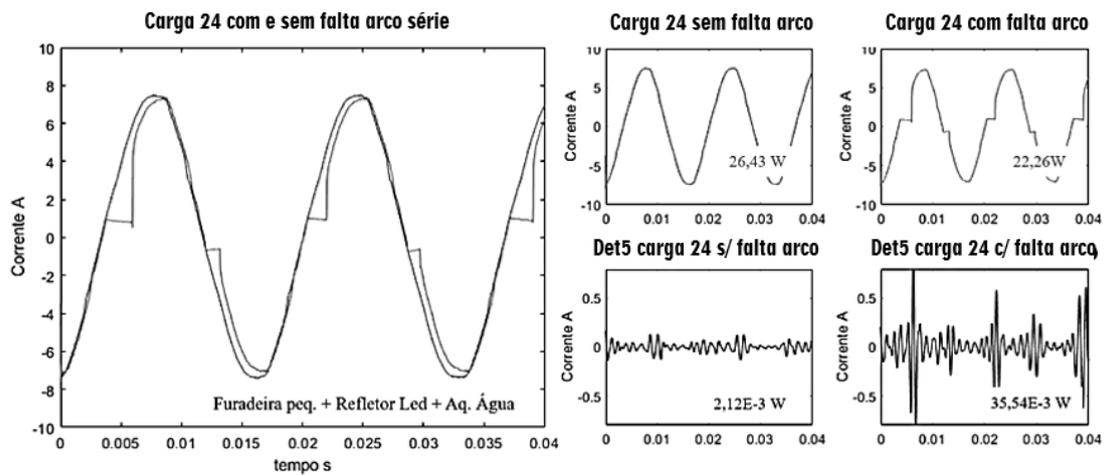
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 23 - Corrente da Carga 23 (Furadeira pequena + Refletor Led + Aq. Água).



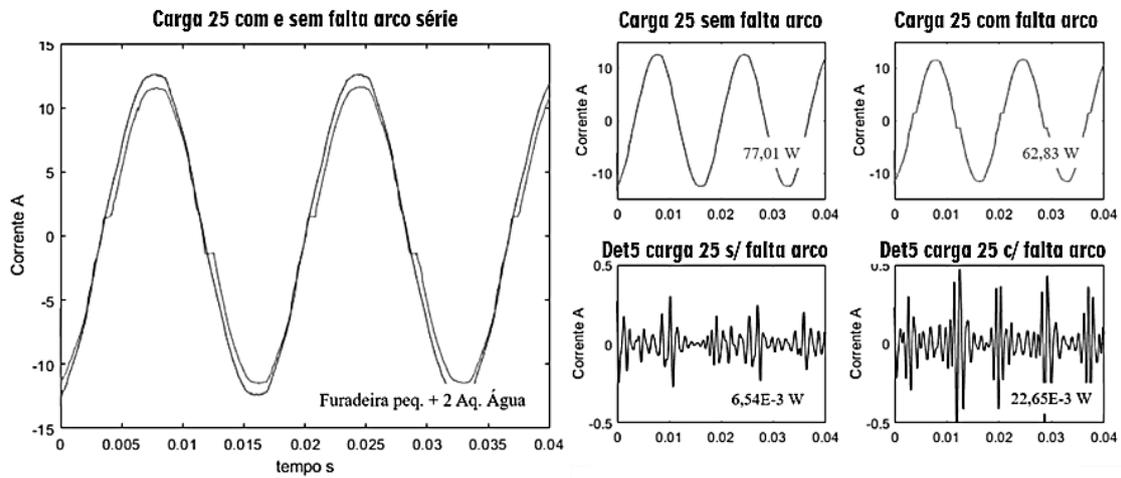
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 24 - Corrente da Carga 24 (Furadeira peq. + Aq. Ambiente 949VA).



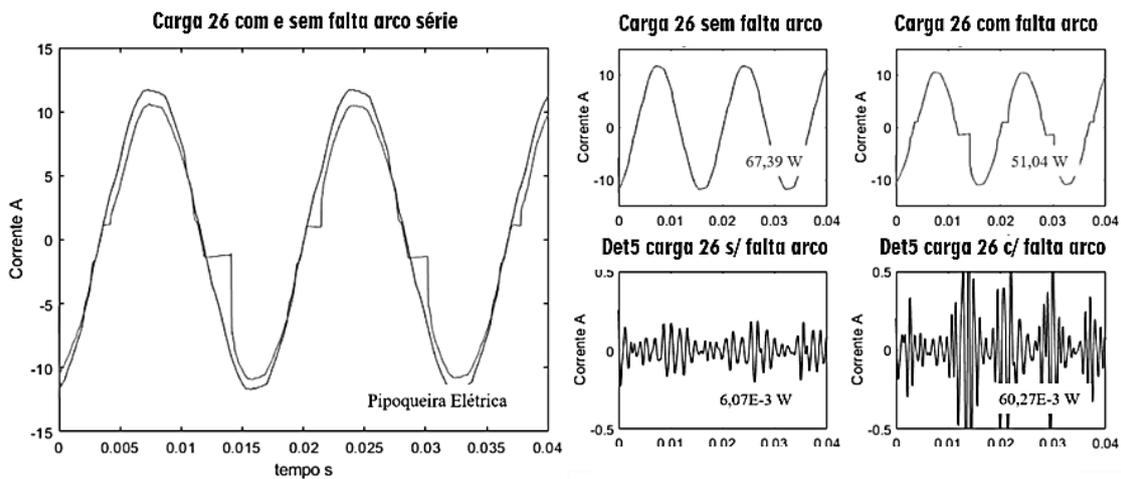
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 25 - Corrente da Carga 25 (Furadeira peq. + 2 Aq. Água 1081VA).



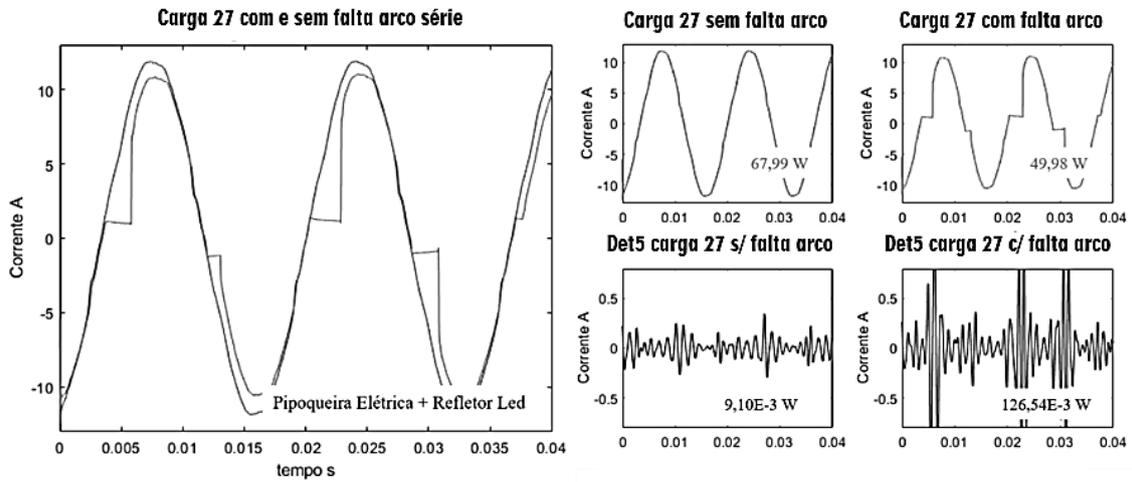
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 26 - Corrente da Carga 26 (Pipoqueira Elétrica 1007VA).



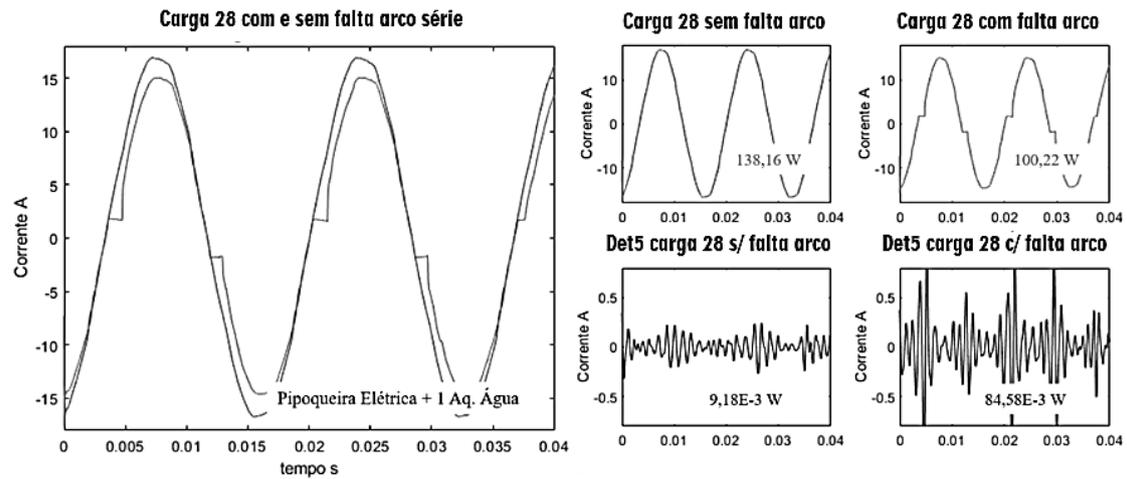
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27 - Corrente da Carga 27 (Pipoqueira + Refletor Led 1012V).



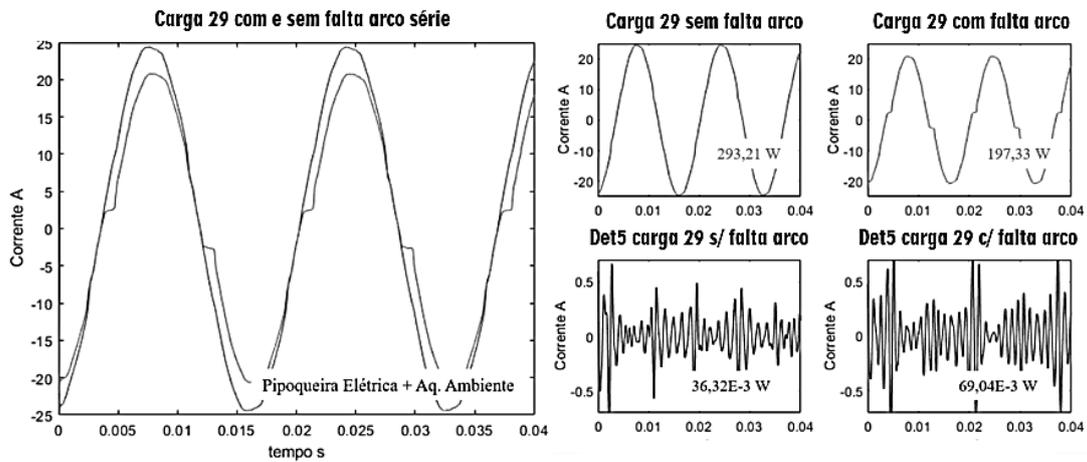
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 28 - Corrente da Carga 28 (Pipoqueira + 1 Aq. Água 1412VA).



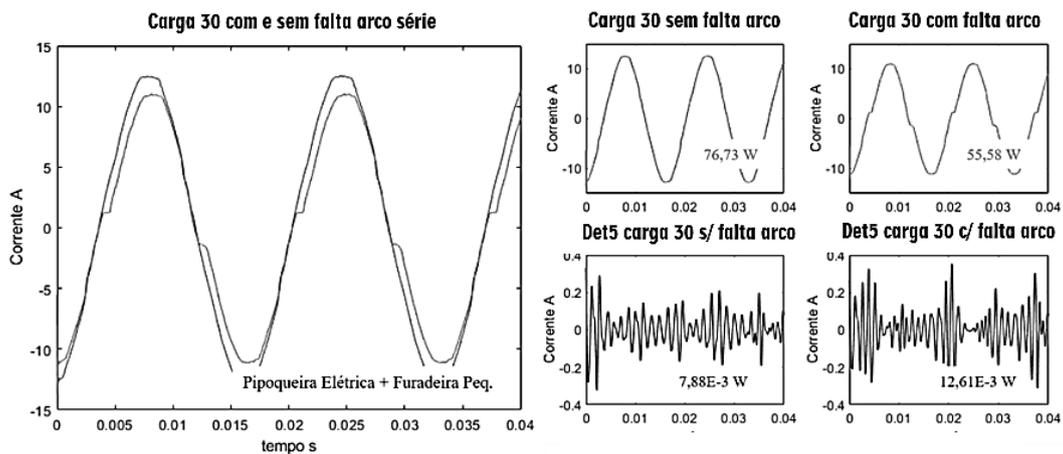
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29 - Sinal de Corrente da Carga 29 (Pipoqueira + Aq. Ambiente 1976VA).



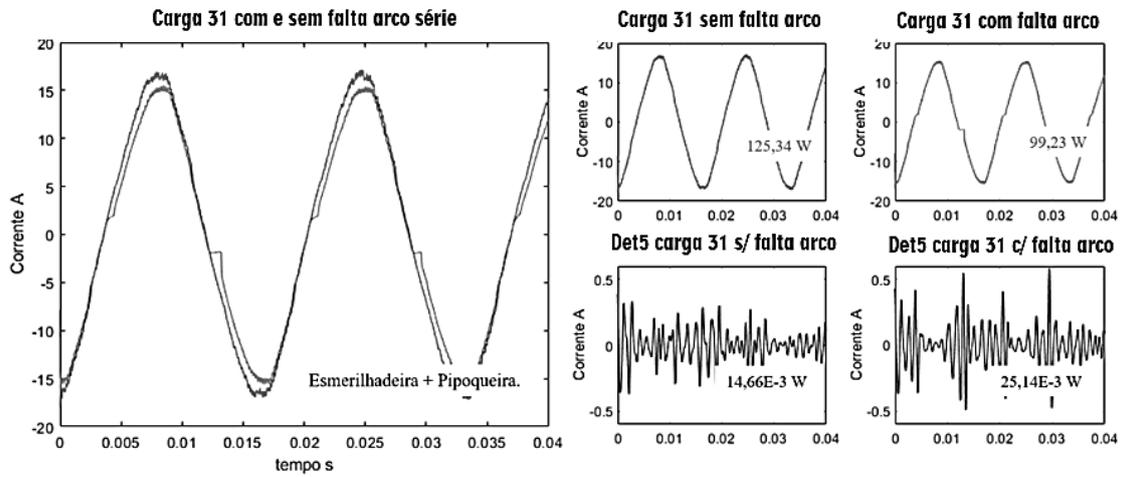
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 30 - Corrente da Carga 30 (Pipoqueira + Furadeira peq. 923VA).



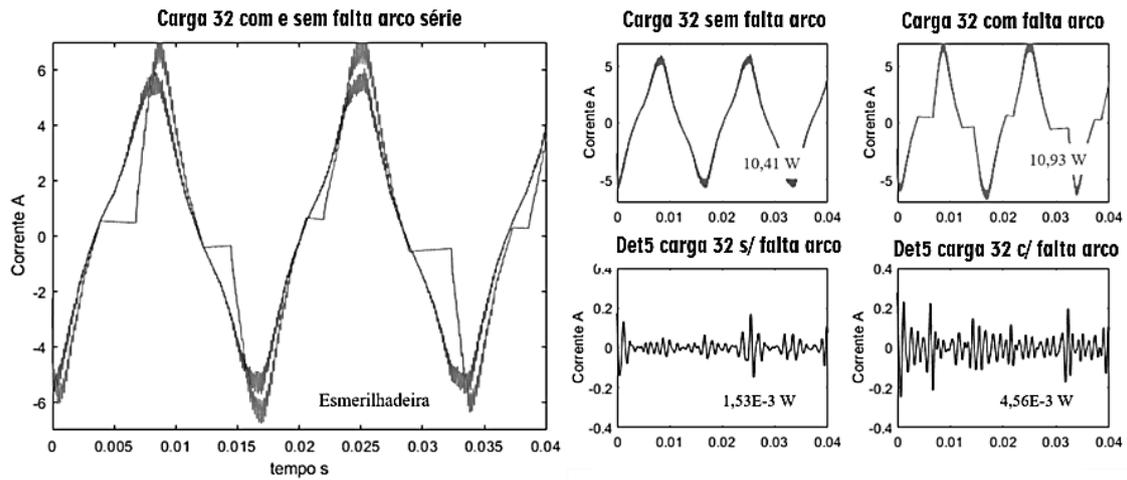
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 31 - Corrente da Carga 31 (Esmerilhadeira + Pipoqueira 1354VA).



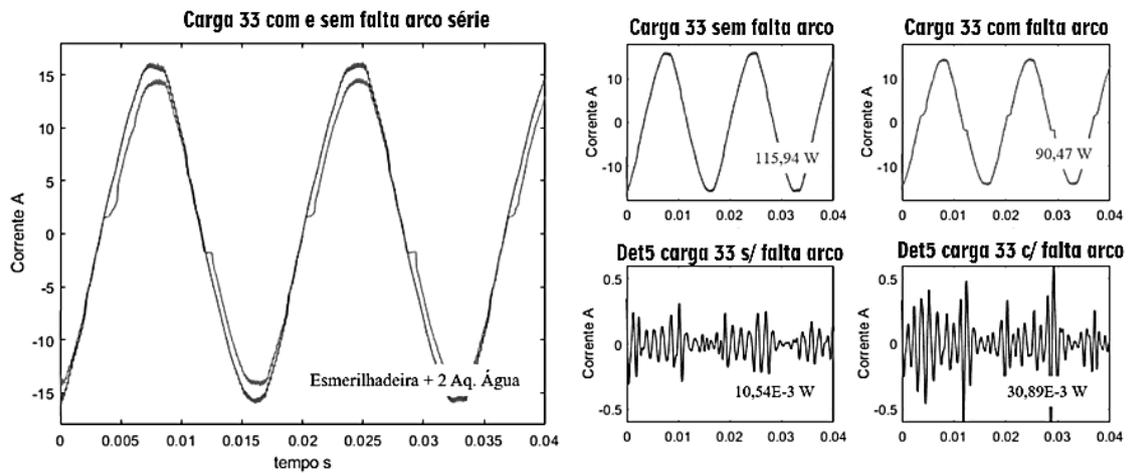
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32 - Corrente da Carga 32 (Esmerilhadeira 403VA).



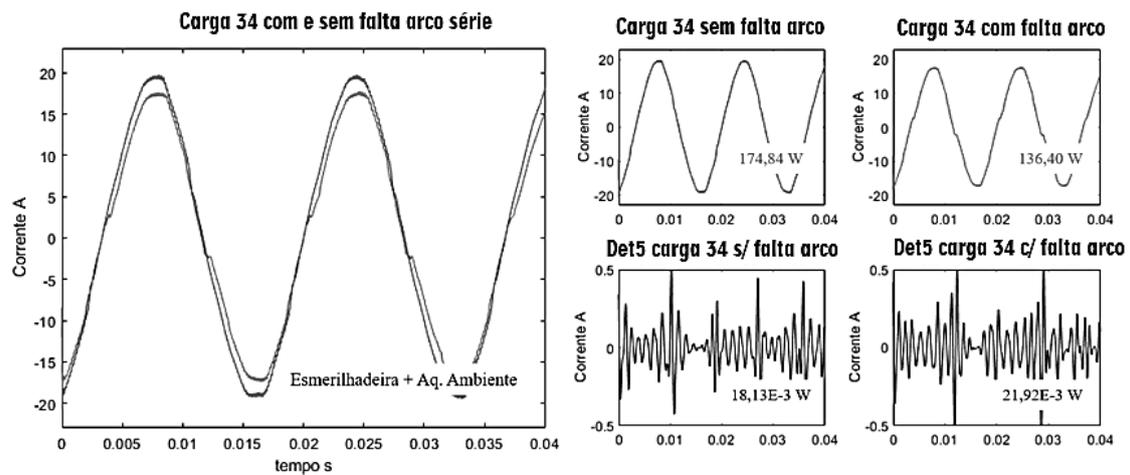
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 33 - Corrente da Carga 33 (Esmerilhadeira + 2 Aq. Água 1304VA).



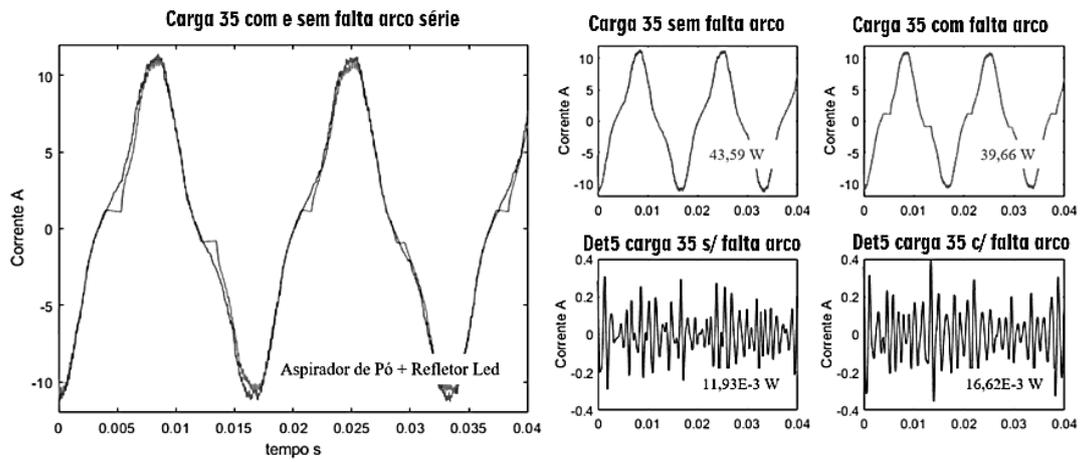
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 34 - Corrente da Carga 34 (Esmerilhadeira + Aq. Ambiente 1593VA).



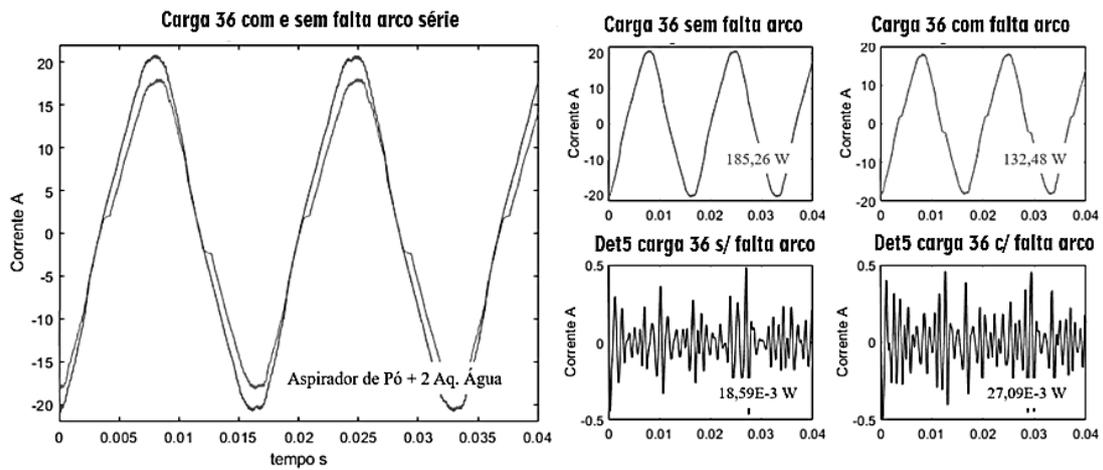
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 35 - Corrente da Carga 35 (Aspirador de Pó + Refletor Led 1007VA).

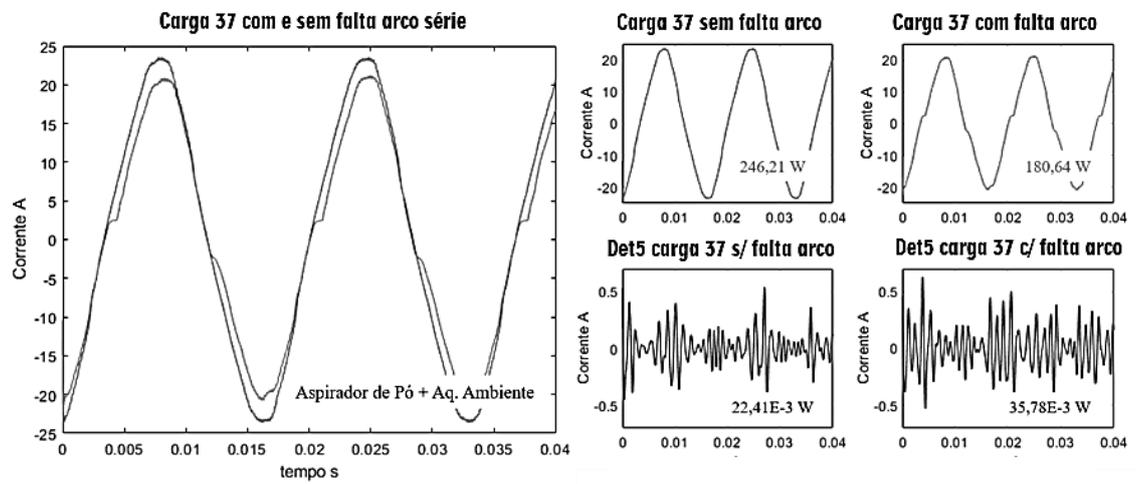


Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 36 - Corrente da Carga 36 (Aspirador de Pó + 2 Aq. Água).



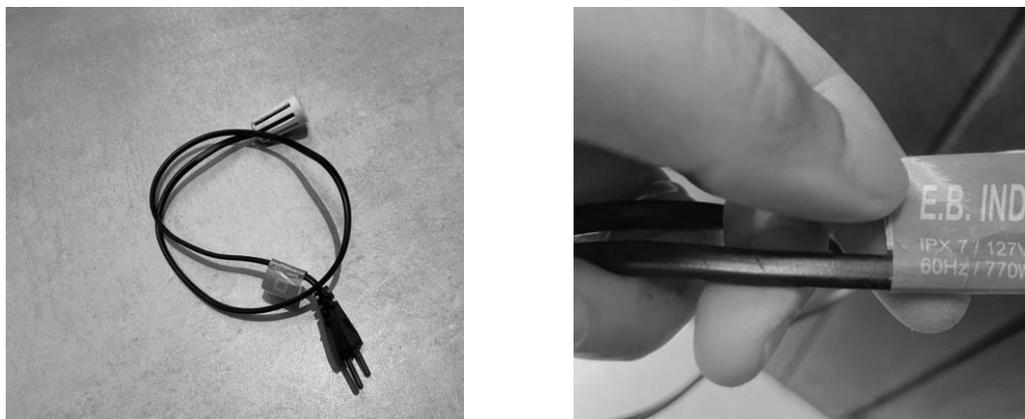
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 37 - Corrente da Carga 37 (Aspirador de Pó + 2 Aq. Ambiente).

Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE 3 - Equipamentos utilizados nos ensaios

Figura 38 - Aquecedor de água 127 e 220V, equipamentos 1 e 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 39 - Aquecedor de ambientes, equipamento 3.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 40 - Furadeira de impacto, equipamento 4.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 41 – Pulverizador de tintas, equipamento 5.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 42 – Cafeteira de cápsulas, equipamento 6.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 43 – Aspirador de pó, equipamento 7.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 44 – Micro-ondas, equipamento 8.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 45 – Mixer, equipamento 9.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 46 – Serra circular, equipamento 10.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 47 – Refletor LED, equipamento 11.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 48 – Computador, equipamento 12.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 49 – Secador de cabelo, equipamento 13.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 50 – Furadeira pequena, equipamento 14.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 51 – Pipoqueira elétrica, equipamento 15.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 52 – Esmerilhadeira, equipamento 16.



Fonte: elaborado pelo autor.

APÊNDICE 4 - Tabela de cargas utilizadas nos ensaios

Figura 53 – Composição das cargas de 1 a 18

CARGA 01	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 01 - Aquecedor Água		
CARGA 02	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente				
CARGA 03	Eq. 04 – Furadeira Impacto				
CARGA 04	Eq. 05 – Pulverizador				
CARGA 05	Eq. 06 – Cafeteira Cápsulas				
CARGA 06	Eq. 07 – Aspirador de Pó				
CARGA 07	Eq. 08 – Microondas				
CARGA 08	Eq. 02 - Aquecedor Água 220V	+	Eq. 02 - Aquecedor Água 220V		
CARGA 09	Eq. 02 - Aquecedor Água 220V	+	Eq. 02 - Aquecedor Água 220V	+	Eq. 02 - Aquecedor Água 220V
CARGA 10	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 09 – Mixer
CARGA 11	Eq. 10 – Serra Circular				
CARGA 12	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente	+	Eq. 11 – Refletor Led		
CARGA 13	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente		
CARGA 14	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente	+	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 11 – Refletor Led
CARGA 15	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 11 – Refletor Led		
CARGA 16	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 11 – Refletor Led
CARGA 17	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 12 – Computador		
CARGA 18	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente	+	Eq. 12 – Computador		

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 54 – Composição das cargas de 19 a 37

CARGA 19	Eq. 13 – Secador de Cabelo		
CARGA 20	Eq. 09 – Mixer	+	Eq. 13 – Secador de Cabelo
CARGA 21	Eq. 11 – Refletor Led	+	Eq. 13 – Secador de Cabelo
CARGA 22	Eq. 05 – Pulverizador	+	Eq. 07 – Aspirador de Pó
CARGA 23	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 11 – Refletor Led + Eq. 14 – Furadeira Pequena
CARGA 24	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente	+	Eq. 14 – Furadeira Pequena
CARGA 25	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 01 - Aquecedor Água + Eq. 14 – Furadeira Pequena
CARGA 26	Eq. 15 – Pipoqueira Elétrica		
CARGA 27	Eq. 15 – Pipoqueira Elétrica	+	Eq. 11 – Refletor Led
CARGA 28	Eq. 15 – Pipoqueira Elétrica	+	Eq. 01 - Aquecedor Água
CARGA 29	Eq. 15 – Pipoqueira Elétrica	+	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente
CARGA 30	Eq. 15 – Pipoqueira Elétrica	+	Eq. 14 – Furadeira Pequena
CARGA 31	Eq. 15 – Pipoqueira Elétrica	+	Eq. 16 – Esmerilhadeira
CARGA 32	Eq. 16 – Esmerilhadeira		
CARGA 33	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 01 - Aquecedor Água + Eq. 16 – Esmerilhadeira
CARGA 34	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente	+	Eq. 16 – Esmerilhadeira
CARGA 35	Eq. 07 – Aspirador de Pó	+	Eq. 11 – Refletor Led
CARGA 36	Eq. 01 - Aquecedor Água	+	Eq. 01 - Aquecedor Água + Eq. 07 – Aspirador de Pó
CARGA 37	Eq. 03 - Aquecedor Ambiente	+	Eq. 07 – Aspirador de Pó

Fonte: elaborado pelo autor.