

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

THIAGO DJOSEFF PINHEIRO REIS

**PROJETO DE UM RETIFICADOR DE CORRENTE
IMPRESSA AUTOMÁTICO**

BETIM – MG

2023

THIAGO DJOSEFF PINHEIRO REIS

**PROJETO DE UM RETIFICADOR DE CORRENTE IMPRESSA
AUTOMÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Helbert Ribeiro de Sá

BETIM – MG

2023

FICHA
CATALOGRÁFICA

R375p Reis, Thiago Djozeff Pinheiro
 Projeto de um retificador de corrente impressa automático /
 Thiago Djozeff Pinheiro Reis. – 2023.
 110 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em
Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim,
2023.

Orientador: Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá

1. Automação. 2. Corrosão. 3. Fonte de corrente. 4. Gasoduto. 5.
Proteção catódica I. Thiago Djozeff Pinheiro Reis. II. Título.

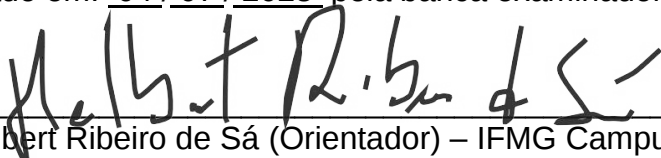
CDU: 681.5

THIAGO DJOSEFF PINHEIRO REIS

**PROJETO DE UM RETIFICADOR DE CORRENTE IMPRESSA
AUTOMÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora
do curso de Engenharia de Controle
e Automação do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Minas Gerais *Campus* Betim, como
parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
de Controle e Automação.

Aprovado em: 04 / 07 / 2023 pela banca examinadora:



Prof. Me. Helbert Ribeiro de Sá (Orientador) – IFMG Campus Betim



Prof. Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa – IFMG Campus Betim

Prof. Me. Felipe Augusto Rocha da Silva – IFMG Campus Betim

BETIM – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela realização dessa conquista e por iluminar o meu caminho para poder alcançar os meus objetivos.

Agradeço a minha família, que me orientou e ajudou desde o começo e todo o amor, carinho e força concedidos.

Agradeço a minha noiva Bárbara Reis Silvestrini pela paciência e apoio nas horas difíceis, por toda a ajuda concedida para que fosse possível a realização desta conquista.

Agradeço meus amigos que me apoiaram, me ajudaram e estiveram comigo ao longo dessa jornada.

Agradeço aos meus colegas de trabalho que me ajudaram e me incentivaram para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do IFMG – Campus Betim pelo aprendizado e por repassarem seus conhecimentos, principalmente ao meu orientador Helbert Ribeiro de Sá pelo apoio e orientação.

Agradeço aqueles que de forma direta ou indireta também contribuíram e fizeram parte desta conquista.

Muito obrigado!

RESUMO

Empresas que realizam o transporte de petróleo, minério, gás natural, água, entre outros, através de tubulações de aço necessitam de medidas para evitar a corrosão química, que ocorre naturalmente no metal, sendo a proteção catódica por corrente impressa uma das maneiras mais utilizadas. Porém, os sistemas existentes no mercado demandam de constante intervenção humana, em que as oscilações na resistividade do solo podem ser consideradas o principal fator contribuinte. A proposta deste trabalho é desenvolver um projeto simulado e de baixo custo de um retificador de corrente impressa automático, que responda às variações percebidas na carga (solo, tubulação e anodos de sacrifício), com supervisão remota, dispensando a necessidade de técnicos irem com frequência ao local, o qual, em muitos casos, é distante de centros urbanos, gerando altos custos de deslocamento e mão de obra. Atingindo os objetivos, haverá grande redução nos custos que hoje são necessários para garantir a integridade de dutos enterrados.

Palavras-chave: Corrosão. Fonte de Corrente. Gasoduto. Proteção catódica. Oxidação. Retificador.

ABSTRACT

Companies that transport petroleum, ore, natural gas, water, among others, through steel pipes need measures to prevent chemical corrosion, which occurs naturally in the metal, with impressed current cathodic protection as one of the most commonly used. However, the existing systems in the market demand constant human intervention, in which oscillations in soil resistivity can be considered the main contributing factor. The purpose of this work is to develop a simulated and low cost project of an automatic impressed current rectifier, which responds to the perceived variations in load (soil, piping and sacrificial anodes), with remote supervision, avoiding the need for technicians to go frequently to the site, which in many cases, is far from urban centers, leading to high costs of displacement and manpower. Meeting the targets, there will be a large reduction in the costs that are now required to ensure the integrity of pipelines.

Keywords: Corrosion. Current source. Pipeline. Cathodic protection. Oxidation. Rectifier.

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Tubulação de aço revestida com polietileno tripla camada	16
Foto 2 - Retificador de corrente impressa	43
Foto 3 – Módulo Relé 5 VDC.....	53
Foto 4 – Resistor de 10 Ω	54
Foto 5 – Kit para montagem do sensor de corrente ACS712-20A	56
Foto 6 – Tela Nextion HMI.....	60
Foto 7 - Projeto final em operação	73
Foto 8 – Automatização de um retificador manual	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tubulação de aço revestida com polietileno tripla camada	16
Figura 2 – Esquema de proteção catódica por corrente impressa	18
Figura 3 – Esquemático elétrico de um retificador por corrente impressa.....	18
Figura 4 – Representação de um sistema completo de proteção catódica por corrente impressa.....	22
Figura 5 – Representação do ciclo dos metais.....	25
Figura 6 – Representação do processo de corrosão eletroquímica	29
Figura 7 – Teste para determinação da corrente necessária à proteção da estrutura	39
Figura 8 – Distribuição do potencial ao longo de uma estrutura em função da posição dos anodos	40
Figura 9 – Gerenciador de Dispositivos do Windows	48
Figura 10 – Esquemático da Arquitetura Harvard	50
Figura 11 – Diagrama de pinos do PIC 18F45K22.....	51
Figura 12 – Diagrama de pinos do ULN2803	52
Figura 13 – Simulação de um sistema duto-solo.....	54
Figura 14 – Símbolos de resistor variável	55
Figura 15 – Diagrama de ligação do sensor ACS712	57
Figura 16 – Amperímetro disponível no <i>Proteus Design Suite</i>	57
Figura 17 – COMPIM do <i>Proteus Design Suite</i>	58
Figura 18 – Diagrama de pinos ESP8266-ESP01.....	59
Figura 19 – Montagem do projeto no <i>Proteus Design Suite</i>	65
Figura 20 – Fluxograma do projeto	67
Figura 21 – <i>Display Nextion</i> conectado na porta serial USB COM5 e módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01 conectado na porta serial USB COM7.....	69
Figura 22 – Rede Wi-Fi criada pelo módulo ESP8266-ESP01 para envio de dados	69
Figura 23 – Tela do aplicativo <i>web</i> (<i>Virtuino</i>) projetado para receber os dados do projeto	70
Figura 24 – Configurações do servidor <i>web</i> do <i>Virtuino</i>	71
Figura 25 – Dados recebidos remotamente de um retificador instalado no SDGN da GASMIG.....	87

Figura 26 – Página 0 (“Abertura”).....	100
Figura 27 – Página 1 (“Apresentacao”)	100
Figura 28 – Página 2 (“Tema”)	101
Figura 29 – Página 3 (“InicioRCI”).....	101
Figura 30 – Página 4 (“MenuAutomatico”)	102
Figura 31 – Página 5 (“AjustadoAutom”)	103
Figura 32 – Página 6 (“LigAutomatico”).....	103
Figura 33 – Página 7 (“AjusteData”).....	104
Figura 34 – Página 8 (MenuManual)	105
Figura 35 – Página 9 (AjustadoManual)	106
Figura 36 – Página 10 (LigadoManual)	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistividade do solo semanal de agosto/2014 a julho/2015	20
Tabela 2 – Formas de corrosão	27
Tabela 3 – Principais reações anódicas e catódicas na corrosão eletroquímica.....	31
Tabela 4 - Série de atividade de metais em solução aquosa	36
Tabela 5 – Corrente recomendada e desgaste esperado para os anodos inertes	39
Tabela 6 – Fator F de correção da velocidade do fluido	41
Tabela 7 – Eficiência do revestimento da tubulação (E)	41
Tabela 8 – Análise do funcionamento do projeto em "Modo Manual"	74
Tabela 9 – Análise do funcionamento do projeto em “Modo Automático”	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada <i>software</i> utilizado no projeto para o ajuste de 0,5 A	78
Gráfico 2 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada <i>software</i> utilizado no projeto para o ajuste de 1,0 A	79
Gráfico 3 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada <i>software</i> utilizado no projeto para o ajuste de 1,5 A	80
Gráfico 4 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada <i>software</i> utilizado no projeto para o ajuste de 2,0 A	81
Gráfico 5 – Tensão VDC aplicada pelo retificador de acordo coma resistência do solo	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Símbolo para medida de corrente elétrica – AMPÈRE.
ASCII – *American Standard Code for Information Interchange* (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação).
CA – Corrente Alternada.
CC – Corrente Contínua.
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais.
CI – Circuito Integrado.
CLP – Controlador Lógico Programável.
COM – Porta para comunicação serial entre um PC e um dispositivo externo.
DPS – Dispositivo de Proteção contra Surtos.
GASMIG – Companhia de Gás de Minas Gerais.
GND – *Ground* (Terra).
GPIO – *General Purpose Input/Output* (Entrada/Saída de Propósito Geral).
GUI – *Graphical User Interface* (Interface Gráfica do Usuário).
IDE – *Integrated Development Environment* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado).
IHM – Interface Homem-Máquina.
IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas).
km – Símbolo para medida de distância – QUILOMETRO.
m – Símbolo para medida de distância – METRO.
MCU – *Microcontroller Unit* (Microcontrolador).
Modbus – Protocolo de comunicação entre dispositivos eletrônicos.
MQTT – *Message Queuing Telemetry Transport* (Transporte de Telemetria de Enfileiramento de Mensagens). Protocolo de comunicação para IoT.
mV – Símbolo para medida de tensão elétrica – MILIVOLT.
PC – *Personal Computer* (Computador Pessoal).
RX – Linha de recepção de dados de um canal serial.
R\$ – Símbolo para se referir a moeda do Brasil – REAL.
SDGN – Sistema de Distribuição de Gás Natural
TAP – Ponto de conexão intermediário na bobina de um transformador que permite ajustar a relação de transformação da tensão.
TFT – *Thin-Film Transistor* (Transistor de Filme Fino). Tecnologia para telas e *displays*.
TTL Serial – *Transistor-Transistor Logic* (Lógica Transistor-Transistor).
TX – Linha de transmissão de dados de um canal serial.
UART – *Universally Asynchronous Receiver/Transmitter* (Receptor/Transmissor Assíncrono Universal).
V – Símbolo para medida de tensão elétrica – VOLT.
VAC – *Voltage Alternating Current* (Tensão em Corrente Alternada).
VDC – *Voltage Direct Current* (Tensão em Corrente Contínua).
Wi-Fi – Wireless Fidelity. É uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a transmissão de dados entre dispositivos eletrônicos.
°C – Símbolo para medida de temperatura – GRAUS CELSIUS.
Ω – Símbolo para medida de resistência elétrica – OHM.
% – Símbolo para medida de porcentagem – POR CENTO.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA.....	19
1.2. TEMA.....	21
1.2.1. Especificação do Tema.....	21
2. OBJETIVOS	23
2.1. OBJETIVO GERAL	23
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1. CONCEITO DE CORROSÃO	24
3.2. CUSTOS DA CORROSÃO	25
3.3. TIPOS DE CORROSÃO	27
3.3.1. Corrosão eletroquímica.....	29
3.3.1.1. Reações anódicas e catódicas	30
3.3.1.2. <i>Natureza química do produto corrosão</i>	31
3.4. MÉTODOS DE CONTROLE DA CORROSÃO	33
3.4.1. Métodos de controle da corrosão eletroquímica	34
3.4.1.1. <i>Proteção catódica por corrente impressa</i>	36
3.4.1.1.1. <i>Dimensionamento do sistema de proteção catódica por corrente impressa</i>	38
4. METODOLOGIA.....	42
4.1. DETALHE DO PROBLEMA.....	42
4.2. CENÁRIO	43
4.3. SOLUÇÃO PROPOSTA	44
4.3.1. Programas utilizados	45
4.3.1.1. <i>Proteus Design Suite</i>	46
4.3.1.2. <i>mikroC PRO for PIC</i>	46
4.3.1.3. <i>COM0COM</i>	47
4.3.1.4. <i>Nextion Editor</i>	48
4.3.1.5. <i>Virtuino</i>	50
4.3.2. Dispositivos utilizados.....	50
4.3.2.1. <i>PIC 18F45K22</i>	50
4.3.2.2. <i>CI ULN2803</i>	52
4.3.2.3. <i>Relés</i>	53
4.3.2.4. <i>Sistema Duto-Solo</i>	53
4.3.2.4.1. <i>Resistor</i>	54

4.3.2.4.2. Resistor Variável (Potenciômetro)	55
4.3.2.4.3. Sensor de Corrente ACS712-20A.....	55
4.3.2.4.4. Capacitor	56
4.3.2.4.5. Amperímetro	57
4.3.2.5. COMPIM	58
4.3.2.6. Módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01	59
4.3.2.7. Nextion HMI	60
5. DESENVOLVIMENTO	61
5.1. DESCRIÇÃO DAS PREMISSAS DO PROJETO	62
5.1.1. Definição das tensões disponíveis.....	62
5.1.2. Definição das correntes disponíveis	63
5.1.3. Simulação do sistema duto-solo	63
5.1.4. Montagem do projeto no <i>Proteus Design Suite</i>	64
5.1.5. Fluxograma do projeto	67
5.1.6. Tela do aplicativo <i>web</i> (<i>Virtuino</i>)	70
6. ANÁLISE DE RESULTADOS	72
6.1. RESULTADOS DA OPERAÇÃO EM “MODO MANUAL”	83
6.2. RESULTADOS DA OPERAÇÃO EM “MODO AUTOMÁTICO”	83
6.3. APLICAÇÃO PRÁTICA BASEADA NO PROJETO.....	85
6.4. POSSÍVEIS MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS	87
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE	93
APÊNDICE B – TELAS DO NEXTION	100

1. INTRODUÇÃO

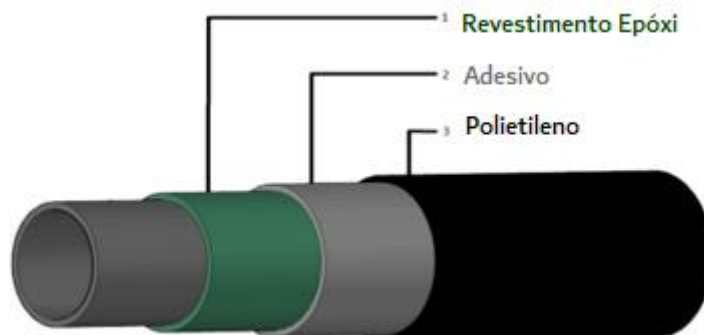
Um dos grandes problemas enfrentados pelas empresas de transporte e distribuição de petróleo, minério, gás natural, água, entre outros, é a corrosão de seus dutos enterrados. Na construção dos dutos o elemento de proteção anticorrosiva primário é o próprio revestimento da tubulação que atualmente é feito (quase que em sua totalidade) com polietileno extrudado de tripla camada (PE3L ou do inglês 3LPE – *3 Layer Polyethylene*) e que possui mais de 99% de eficiência. Esse tipo de sistema é aplicado em tubulações que operam em temperaturas que variam de -40 °C a +85 °C, ou seja, atende toda faixa de temperatura encontrada em nosso país e, mais especificamente, em todo o estado de Minas Gerais, onde se concentram as operações da GASMIG. Este tipo de proteção é mostrado na Foto 1 e na Figura 1.

Foto 1 – Tubulação de aço revestida com polietileno tripla camada



Fonte: <http://www.asp-jo.com/3lpe-coated-pipes>

Figura 1 – Tubulação de aço revestida com polietileno tripla camada

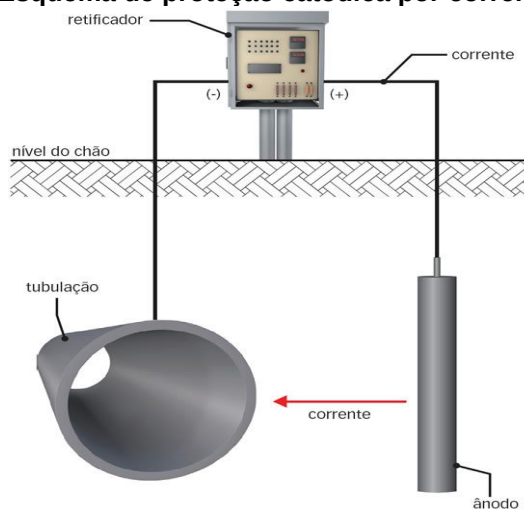


Fonte: <http://www.asp-jo.com/3lpe-coated-pipes>

No entanto, durante o próprio processo de instalação do duto ou até mesmo com os esforços que os dutos, mesmo enterrados, sofrem ao longo do tempo, o revestimento acaba sendo danificado em alguns pontos da tubulação, o que deixa todo o duto exposto à corrosão eletroquímica causada pelo contato direto com o solo. Dessa forma, é preciso ter um método alternativo de proteção do duto que, dentre todas as opções disponíveis, destaca-se a proteção catódica.

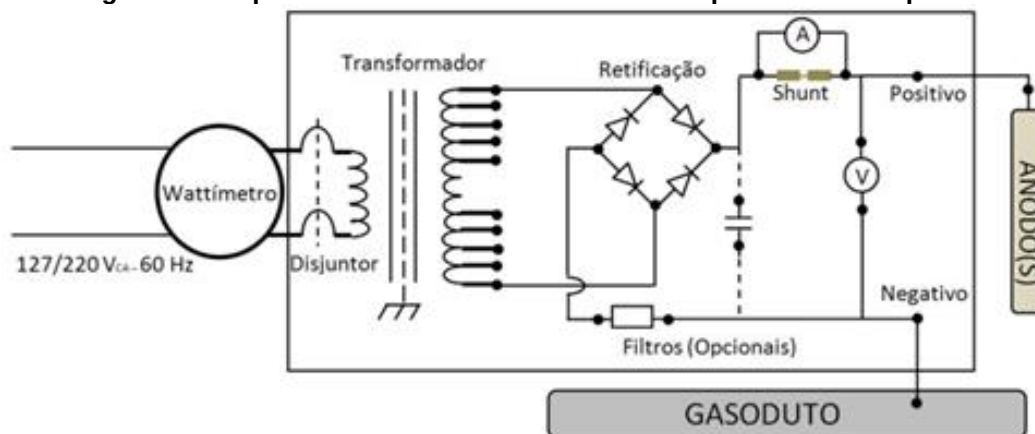
A proteção catódica é uma técnica usada para controlar a corrosão natural de uma superfície metálica, tornando-a o catodo de uma célula eletroquímica. Foi aplicada a gasodutos de aço a partir de 1928 e mais amplamente na década de 1930 (PEABODY, 2001). No Brasil, o primeiro duto com proteção catódica foi o ORBEL I (Oleoduto Rio-Belo Horizonte), em 1967. O método mais simples dessa aplicação, chamado de proteção catódica galvânica, se dá com a conexão do metal a ser protegido a um “metal de sacrifício” que atuará como anodo no sistema devido às suas propriedades físicas que o tornam mais corrosivo e, assim, este “anodo de sacrifício” é corroído no lugar da tubulação.

Ainda assim, em alguns casos como projetos para tubulações muito extensas, ou onde a resistividade do eletrólito é alta, a proteção catódica galvânica, que é passiva, se torna inadequada e insuficiente. Nestas situações é utilizada a proteção catódica por corrente impressa (ROBERGE, 2008) que consiste na ligação de um leito de anodos a uma fonte de alimentação de corrente contínua (retificador, ou, fonte CC), sendo o terminal negativo de saída CC conectado à estrutura a ser protegida pelo sistema de proteção catódica e o terminal positivo de CC da saída do retificador conectado aos anodos. O valor da corrente elétrica deve ser estabelecido de acordo com as dimensões físicas do projeto e deverá garantir a polarização dos anodos de sacrifício com um potencial acima do valor de potencial ao qual se estabiliza o catodo. O esquema geral deste tipo de proteção é mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de proteção catódica por corrente impressa

Fonte: Rodnei Corsini (2011)

Caso os dutos fossem enterrados com a superfície completamente descoberta, o valor de corrente necessário para proteção seria demasiadamente alto, devido à fuga de corrente da tubulação para o solo, elevando o custo do projeto consideravelmente, pois demandaria de uma potência muito maior. Assim, o uso de materiais de revestimento, como o já citado polietileno em tripla camada (3LPE), contribui bastante, tanto na proteção mecânica do tubo quanto contra corrosão e, por consequência, gera grande redução de custos de projeto de sistemas de proteção catódica. Ainda assim, retificadores de corrente impressa são equipamentos de alto custo, mesmo que não possuam alta complexidade, como mostrado no esquemático elétrico apresentado pela Figura 3.

Figura 3 – Esquemático elétrico de um retificador por corrente impressa

Fonte: Soares, R. M. S., et al. (2019)

1.1. JUSTIFICATIVA

A grande maioria dos sistemas de proteção catódica por corrente impressa em operação nas empresas que possuem dutos enterrados exige a necessidade de constante atuação no equipamento por parte dos técnicos, devido ao fato do sistema operar em malha aberta, ou seja, as alterações que surgem no processo não são tratadas automaticamente.

O método utilizado atualmente implica na inserção de uma tensão elétrica contínua com valor fixo pré-definido ao sistema, e o controle da corrente é realizado através da alteração mecânica de TAP's de um transformador, variando a tensão de entrada da etapa de retificação. O principal motivo que demanda visita em campo por parte dos técnicos de operação e manutenção é a variação da resistência do solo, que consequentemente irá alterar a corrente impressa no circuito, pois o método atual utiliza uma fonte de tensão fixa constante.

Conforme estudo feito entre agosto de 2014 e julho de 2015 pelo Sr. José Leonardo Resende, funcionário da CEMIG que esteve cedido à GASMIG no período de 2005 a 2020 (RESENDE, 2018), o valor da diferença entre as magnitudes máxima e mínima da resistividade do solo mensurado nas dependências da GASMIG foi de 453% ao longo de um ano, com a média semanal mínima medida de 76,84 Ωm e a máxima de 348,35 Ωm , conforme apresentado pela Tabela 2 do referido estudo (vide Tabela 1). Essa tabela mostra de forma detalhada como o período chuvoso interfere de forma direta na diminuição da resistividade do solo e como o período de seca atua justamente no oposto, elevando o valor da resistividade. Com base nesses dados, fica evidente a necessidade da constante intervenção humana para o ajuste da corrente fornecida pelo retificador, a fim de se evitar que a tubulação fique desprotegida ou até mesmo com uma sobre proteção, o que também é indesejado.

Como boa parte dos retificadores se encontram em trechos rurais e de difícil acesso, estas manobras, apesar de simples, apresentam um valor financeiro alto, devido aos custos de deslocamento do funcionário e, além disso, ainda expõe o funcionário há um risco, uma vez que ele irá manusear equipamentos de alta potência e conectados à rede elétrica.

Tabela 1 – Resistividade do solo semanal de agosto/2014 a julho/2015

Data		1,5m	3m	4,5m	6m	Média	Condição solo
		[$\Omega.m$]	[$\Omega.m$]	[$\Omega.m$]	[$\Omega.m$]	[$\Omega.m$]	
04/08/2014	Ago S1	287,46	130,50	69,46	20,73	127,04	Superfície seca
11/08/2014	Ago S2	349,66	158,08	94,25	45,24	161,81	Superfície seca
18/08/2014	Ago S3	403,38	200,37	119,60	60,32	195,92	Seco
25/08/2014	Ago S4	465,58	250,70	144,20	82,94	235,86	Seco
01/09/2014	Set S1	507,05	276,46	161,16	91,73	259,10	Seco
08/09/2014	Set S2	572,08	292,17	170,59	168,39	300,81	Seco
15/09/2014	Set S3	604,44	304,11	175,30	103,04	296,72	Seco
24/09/2014	Set S4	620,46	312,90	238,45	129,43	325,31	Seco
29/09/2014	Set S5	630,52	307,88	189,44	110,58	309,60	Seco
08/10/2014	Out S1	653,14	314,79	205,46	177,19	337,64	Seco
15/10/2014	Out S2	644,03	333,64	235,62	179,70	348,25	Seco
23/10/2014	Out S3	282,49	129,31	61,36	27,65	125,20	Molhado
31/10/2014	Out S4	227,70	107,82	51,46	25,01	103,00	Molhado
07/11/2014	Nov S1	279,35	130,12	69,74	35,06	128,57	Meio seco
14/11/2014	Nov S2	244,20	119,19	58,81	26,77	112,24	Molhado
21/11/2014	Nov S3	247,68	114,10	58,81	28,65	112,31	Superfície seca
05/12/2014	Dez S1	195,75	90,67	47,78	23,37	89,39	Molhado
19/12/2014	Dez S3	196,04	91,23	49,76	25,26	90,57	Superfície seca
30/12/2014	Dez S4	248,88	136,22	78,41	41,47	126,24	Seco
09/01/2015	Jan S1	344,95	191,89	114,32	62,83	178,50	Seco
20/01/2015	Jan S3	470,30	247,56	152,68	95,50	241,51	Seco
29/01/2015	Jan S4	320,44	172,16	71,91	34,31	149,70	Molhado
03/02/2015	Fev S1	357,20	183,59	79,73	38,45	164,75	Superfície seca
10/02/2015	Fev S2	178,69	87,71	39,58	18,47	81,12	Molhado vários dias de chuva)
20/02/2015	Fev S3	215,39	104,55	52,31	23,00	98,81	Molhado
04/03/2015	Mar S1	198,99	92,24	46,18	22,24	89,91	Úmido
13/03/2015	Mar S2	167,38	81,37	39,02	19,60	76,84	Úmido
26/03/2015	Mar S4	171,97	81,62	40,53	20,73	78,71	Úmido
15/04/2015	Abr S2	255,95	128,99	75,21	40,72	125,22	Seco
27/04/2015	Abr S4	237,13	106,31	59,94	30,16	108,38	Seco/pouco úmido
06/05/2015	Mai S1	199,74	90,98	47,22	24,13	90,52	Úmido
11/05/2015	Mai S2	192,27	88,59	46,46	22,62	87,49	Úmido
28/05/2015	Mai S4	246,14	121,77	71,63	39,33	119,72	Seco
11/06/2015	Jun S2	292,17	152,93	91,89	51,02	147,00	Seco
25/06/2015	Jun S4	353,43	192,27	123,84	68,36	184,47	Seco
03/07/2015	Jul S1	397,73	211,12	135,72	79,17	205,93	Seco
09/07/2015	Jul S2	414,69	218,65	139,49	82,94	213,94	Seco
22/07/2015	Jul S3	466,53	240,02	151,74	94,25	238,13	Seco
Média	-	345,81	173,54	101,55	59,75	170,16	-

Fonte: José Leonardo Resende (2018)

1.2. TEMA

Segundo Gervásio (2013), a proteção catódica é uma técnica para reduzir a corrosão eletroquímica de uma estrutura metálica enterrada ou submersa fazendo com que esta superfície se comporte como o catodo de uma pilha, através da aplicação de uma corrente contínua com intensidade suficiente.

Existem dois métodos para a aplicação dos sistemas de proteção catódica. O primeiro é o sistema galvânico, que utiliza anodos galvânicos ou de sacrifício de ligas especiais de Magnésio, Zinco ou Alumínio. A diferença de potencial entre o aço e o anodo faz com que circule uma corrente elétrica através do eletrólito (solos, água ou concreto). Essa circulação de corrente modifica o potencial do aço em relação ao eletrólito, eliminando as pilhas de corrosão. Os sistemas galvânicos são muito utilizados para a proteção de instalações submersas, estruturas de concreto e pequenas tubulações enterradas. O segundo método é o sistema por corrente impressa. Esse sistema utiliza uma fonte externa de corrente (retificadores de proteção catódica) e anodos inertes especiais. Nesse caso a corrente elétrica de proteção é gerada pelo retificador e não pela diferença de potencial entre a estrutura e o anodo. Os sistemas por corrente impressa são muito utilizados para a proteção de instalações submersas, obras de concreto e grandes tubulações enterradas. A escolha de um ou de outro depende de vários fatores técnicos e de um estudo econômico adequado (IEC ENGENHARIA, 2020).

1.2.1. Especificação do Tema

Segundo Capasciutti (2015), um sistema de proteção catódica por corrente impressa, instalado e operando, é composto basicamente pelos retificadores, leitos de anodos, drenagens elétricas e pontos de teste, como representado pela Figura 4.

Os retificadores são equipamentos que abaixam a tensão elétrica alternada de fornecimento (13,8kV, 220V, etc.) para valores adequados à corrente necessária para a proteção dos dutos, retificando-a para CC através de diodos de silício, por onda completa. O monitoramento de seus parâmetros elétricos é feito através de um shunt e instrumentos instalados no painel do

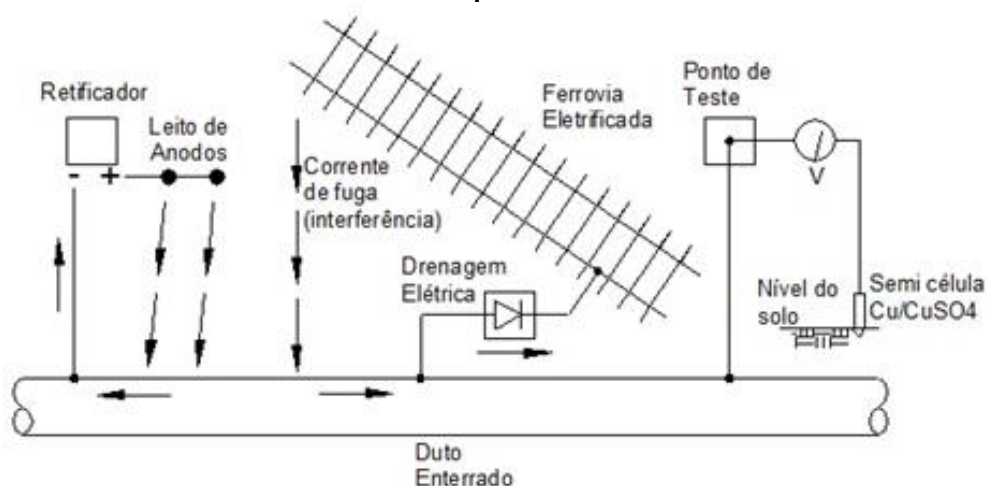
mesmo. A proteção contra transientes elétricos é feita através de para-raios, fusíveis, varistores, centelhadores, aterramento, etc.

O leito de anodos é constituído de eletrodos de liga metálica de baixa taxa de desgaste, instalados no solo. Geralmente são ligas de Ferro-Silício, Ferro-Silício-Cromo, ou Titânio enriquecido com óxidos de metais nobres, e grafite.

Os equipamentos de drenagem elétrica criam o caminho que direciona o retorno das correntes de interferência para seus circuitos de origem. São constituídos basicamente de um condutor elétrico instalado entre a estrutura interferida (duto) e a interferente (Ex.: sistema de tração eletrificada), com o sentido da corrente direcionado através de um diodo.

Os pontos de teste são dispositivos acessórios que tornam o duto enterrado acessível para medições elétricas na superfície do solo. São constituídos por cabos elétricos ligados ao duto e trazidos até a superfície onde são instalados em caixas de concreto ou metálicas, com bornes para a conexão de instrumentos de medição. São instalados em distâncias entre si de modo que possibilitem o conhecimento do nível do potencial elétrico conferido à estrutura protegida, em toda a sua extensão.

Figura 4 – Representação de um sistema completo de proteção catódica por corrente impressa



Fonte: Aymar Capasciutti (2015)

2. OBJETIVOS

Desenvolver um projeto de retificador de corrente impressa automático didático, para fins de proteção catódica de dutos enterrados – apresentado através de simulações virtuais, com o uso de *softwares* computacionais instalados nos computadores disponíveis nos laboratórios do *Campus* Betim – como trabalho de conclusão de curso, que será apresentado ao curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG, como parte das exigências para obtenção do título de Graduação.

2.1. OBJETIVO GERAL

Apresentar um projeto simulado de um sistema de controle automático para retificador de corrente impressa de proteção catódica, com boa confiabilidade e composto por dispositivos de baixo custo. Além disso, espera-se que esse projeto seja base para o desenvolvimento de adequações dos retificadores de operação manual e transformá-los em automáticos, de forma a reduzir o custo com a operação e manutenção desse tipo de equipamento, uma vez que não será necessário a ida do funcionário até o equipamento toda vez que houver uma alteração na resistência do solo e, por consequência, também há uma grande questão de segurança envolvida, já que com atuação automática o funcionário deixa de ficar exposto ao risco de acidente com eletricidade, pois os retificadores estão ligados diretamente na rede elétrica de alta potência (CEMIG).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Utilizar o *software Proteus Design Suite* para desenvolver uma simulação de um sistema de proteção catódica de corrente impressa, que será comandado por uma tela *Nextion* (que é sensível ao toque) e com as análises e tomadas de decisões feitas por um microcontrolador programado em linguagem “C” (através do *software mikroC*). Será utilizado um módulo Wi-Fi (ESP8266) para envio dos dados de tensão e corrente aplicadas pelo retificador e da resistência do solo para acompanhamento de forma remota.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado o assunto que é a parte fundamental deste trabalho, uma vez que o mesmo apresenta uma solução teórica para controlar, reduzir ou até mesmo inibir a ocorrência dela; a corrosão em dutos terrestres enterrados.

3.1. CONCEITO DE CORROSÃO

Segundo Gervásio (2013), a corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos. Pode incidir sobre diversos tipos de materiais, metálicos ou não metálicos.

Para Gentil (2011), a corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. Ele também diz que a corrosão, em geral, um processo espontâneo, está constantemente transformando os materiais metálicos de modo que a durabilidade e desempenho dos mesmos deixam de satisfazer os fins a que se destinam, e não fora o emprego de mecanismos protetores, ter-se-ia a destruição completa de materiais metálicos, já que os processos de corrosão são reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos e pelo fato de ser, geralmente, uma reação de superfície, faz supor que ela possa ser controlada pelas propriedades dos produtos de corrosão.

De acordo com Vaz, Acciari e Codaro (2011), a corrosão pode ser explicada como a deterioração do material metálico que se inicia na sua superfície por ação química ou eletroquímica de um meio oxidante, agravada geralmente por esforços mecânicos.

Já Wolyneć (2003), afirma que a corrosão metálica é uma reação que ocorre envolvendo energia, logo, esta será espontânea se o sistema metal/meio perder energia, ou seja, se a variação de energia durante o processo de corrosão for negativa, por exemplo, a exposição do aço em atmosfera agressiva. Se a variação de energia for positiva, a reação não será espontânea, ou seja, será necessário fornecer energia ao sistema metal/meio

para que esta reação possa ocorrer, como nos processos de eletrodeposição no qual o anodo metálico é corroído mediante o fornecimento de energia.

Por último, segundo Nunes e Lobo (2014), o processo de corrosão é caracterizado de acordo com o “ciclo dos metais”, representado pela Figura 5, sendo o inverso do processo metalúrgico (no qual para obtenção do metal adiciona-se energia ao meio), ou seja, o metal retorna de forma espontânea aos óxidos que lhe deram origem, com consequente liberação de energia.

Figura 5 – Representação do ciclo dos metais



Fonte: Nunes e Lobo (2014)

3.2. CUSTOS DA CORROSÃO

Em países industrializados calcula-se que a corrosão dos materiais provoca perdas da ordem de 3,5% do PIB. Se essa estimativa for aplicada ao caso brasileiro, chega-se a um valor de pelo menos US\$ 20 bilhões anuais. Adotadas as medidas preventivas contra a corrosão, 30% dessas perdas poderiam ser evitadas, considerando que a degradação de estruturas metálicas pela ação do meio ambiente e até perdas de vidas humanas também estão em jogo (HOAR, 1971, apud SILVA, 2006).

Considerando as perdas em termos de quantidade de material danificado pela corrosão, estima-se que seja utilizado mais de 30% do aço produzido no mundo para a reposição de estruturas, partes de equipamentos e

instalações deterioradas pela corrosão (TOMASHOV, 1986, apud SILVA, 2006).

Os principais problemas ocasionados pela corrosão no mundo inteiro no setor industrial estão sendo, o alto custo de projetos e redução da segurança operacional, redução da eficiência de processos, aumento do custo de manutenção, paradas completas de plantas industriais, perdas e contaminações de produção (ROBERGE, 1999 apud SERENÁRIO, 2018).

As perdas econômicas que atingem as mais variadas áreas de atividade podem ser classificadas em diretas e indiretas. São perdas diretas: os custos de substituição das peças ou equipamentos que sofreram corrosão, incluindo-se energia e mão-de-obra; os custos e a manutenção dos processos de proteção (proteção catódica, recobrimentos, pinturas, etc.). Já as perdas indiretas são: atrasos; litígios; multas; indenizações; desgaste da imagem do produto e/ou serviço; danos compensatórios; paralisações acidentais; perda de produto; perda de eficiência. As perdas indiretas são mais difíceis de avaliar, pois nem sempre podem ser quantificadas e podem ter um custo mais elevado comparado com a perda direta (GENTIL, 2011).

Um estudo inovador sobre os custos associados à corrosão metálica divulgada pela *US Federal Highway Administration (FHWA)* em 2002, estimou o custo total (direto e indireto) da corrosão na ordem de US\$ 276 bilhões por ano, o que representa 3,1% do Produto Interno Bruto (PIB) dos Estados Unidos em 1998. No caso do Brasil, considerado o PIB na ordem de US\$ 880 bilhões (em 2005), pode-se estimar o custo anual da corrosão em US\$ 26,4 bilhões (3,0% do PIB) e o custo direto anual dos meios de combate à corrosão de US\$ 12 bilhões (1,38% do PIB). Adotando-se as práticas já conhecidas de combate à corrosão, a economia anual pode chegar a US\$ 8 bilhões (1,0% do PIB). O custo global atual da corrosão é estimado em US\$ 2,5 trilhões, equivalente a 3,4% do PIB global (2013). Usando as práticas de controle de corrosão disponíveis, estima-se que economias entre 15% e 35% do custo da corrosão possam ser realizadas, ou seja, entre US\$375 e US\$875 bilhões anualmente, em nível global (KOCH, 2017).

3.3. TIPOS DE CORROSÃO

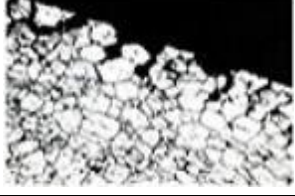
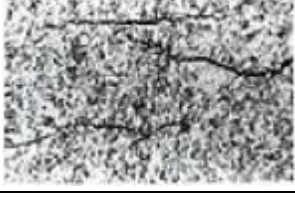
Segundo Gentil (2011), a corrosão pode ocorrer sob diferentes formas, e o conhecimento das mesmas é muito importante no estudo dos processos corrosivos. As formas (ou tipos) de corrosão podem ser apresentadas considerando-se a aparência ou forma de ataque e as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Assim pode-se ter corrosão segundo:

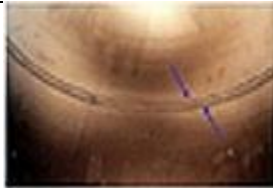
- a morfologia — uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), intragranular (ou transgranular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno de cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- as causas ou mecanismos — por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e dezincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- os fatores mecânicos — sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- o meio corrosivo — atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos etc.;
- a localização do ataque — por pite, uniforme, intergranular, transgranular etc.

Ainda segundo Gentil (2011), a caracterização segundo a morfologia auxilia bastante no esclarecimento do mecanismo e na aplicação de medidas adequadas de proteção. A Tabela 2 apresenta as características fundamentais das diferentes formas de corrosão.

Tabela 2 – Formas de corrosão

Tipo de Corrosão	Ilustração	Descrição
Uniforme		resulta em uma penetração bastante uniforme em toda a superfície metálica exposta, ocorrendo perda uniforme de espessura com formação de escamas de ferrugem. A corrosão uniforme geralmente resulta da exposição atmosférica (especialmente ambientes industriais poluídos) sofrendo ação do oxigênio e da umidade.

Por placas		localiza-se em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas com escavações.
Alveolar		ocorre produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor do que o seu diâmetro.
Por pite		ocorre em pequenas áreas ou em pontos localizados na superfície metálica produzindo cavidades que apresentam profundidade geralmente maior o que seu diâmetro. Estas cavidades são chamadas em inglês de "pitting" e traduzidas para o português ficaram pites. O problema maior deste tipo de corrosão é que dependendo da espessura da chapa, podem apresentar perfurações que atravessam a espessura.
Intergranular (ou intercristalina)		a corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico.
Intragranular (ou transgranular)		a corrosão se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico.
Filiforme		a corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se ultrapassam.
Esfoliação		a corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica, ocorre em chapas ou componentes extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados.
Grafítica		a corrosão se processa no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente e o ferro metálico é convertido em produtos de corrosão, restando a grafite intacta.

Dezincificação		é a corrosão que ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), observando-se o aparecimento de regiões em coloração avermelhada contrastando com a característica coloração amarela dos latões.
Empolamento pelo hidrogênio		penetração do hidrogênio atômico no material metálico, com rápida difusão, transformando-se em regiões com descontinuidade, em hidrogênio molecular, exercendo pressão e formando bolhas
Em torno do cordão de solda		forma de corrosão que se observa em torno de cordão de solda. Ocorre em aços inoxidáveis não-estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%, e a corrosão se processa intergranularmente.

Fonte: Adaptado de Gentil (2011)

3.3.1. Corrosão eletroquímica

De acordo com Gervásio (2013), os processos de corrosão eletroquímica são os mais frequentes na natureza e geralmente ocorrem na presença de água no estado líquido e à temperatura ambiente e há formação de uma pilha ou célula de corrosão. Ainda segundo ele, a corrosão eletroquímica ocorre em eletrodos onde há a formação de anodos e catodos (pilha), entre as quais há a circulação de uma corrente, conforme apresentado pela Figura 6.

Figura 6 – Representação do processo de corrosão eletroquímica



Fonte: Gervásio (2013)

Gentil (2011) diz que, na corrosão eletroquímica, os elétrons são cedidos em determinada região e recebidos em outra, aparecendo uma pilha de corrosão. Esse processo eletroquímico de corrosão pode ser decomposto em três etapas principais:

- processo anódico — passagem dos íons para a solução;
- deslocamento dos elétrons e íons — transferência dos elétrons das regiões anódicas para as catódicas pelo circuito metálico e difusão de ânions e cátions na solução;
- processo catódico — recepção de elétrons, na área catódica, pelos íons ou moléculas existentes na solução.

Deve-se notar que os processos anódicos e catódicos são rigorosamente equivalentes: a passagem de um cátion para o anólito, solução em torno do anodo, é acompanhada da descarga simultânea de um cátion no católito, solução em torno do catodo, não se produzindo acúmulo de eletricidade. Como é seguida a lei de Faraday, a intensidade do processo de corrosão pode ser avaliada tanto pelo número de cargas dos íons que passam à solução no anodo como pelo número de cargas dos íons que se descarregam no catodo, ou ainda pelo número de elétrons que migram do anodo para o catodo.

Já segundo Mainier (2006), a corrosão eletroquímica é um processo espontâneo no qual se estabelece uma diferença de potencial entre metais ou partes de um metal, na presença de um eletrólito, de forma a ocorrer, simultaneamente, reações anódicas e catódicas. A transferência dos elétrons da região anódica para catódica é feita por meio de um condutor metálico – tipicamente o próprio metal, de maneira que a difusão de ânions e cátions na solução fecha o circuito elétrico. A solução na qual a corrente é conduzida na forma de íons é denominada eletrólito. O metal ou a região do metal que perde elétrons (corrói/oxida) é o anodo. O metal ou a região do metal que recebe elétrons (reduz) é o catodo.

3.3.1.1. Reações anódicas e catódicas

As reações que ocorrem na área anódica são de oxidação. Nessas reações o átomo é separado do retículo cristalino do metal e penetra a camada das moléculas da solução aquosa formando um cátion metálico no eletrólito,

sendo as reações anódicas responsáveis pelo desgaste do material. Conforme apresentado na Tabela 3, as reações de dissolução do metal para formar cátions e para formar produtos de corrosão sólidos são representadas, respectivamente, pelas expressões (a) e (b). As reações na área catódica são de redução e ocorrem com íons do meio corrosivo ou, eventualmente, com íons metálicos da solução. As reações catódicas mais comuns são representadas pelas expressões (c), (d) e (e), sendo aquelas representadas por (f) e (g) menos frequentes (MELLO, 2011).

Tabela 3 – Principais reações anódicas e catódicas na corrosão eletroquímica

(a) Dissolução do metal formando cátions	$M \rightarrow M^{+n} + ne^{-}$
(b) Dissolução do metal formando produtos de corrosão sólidos	$M^{+n} + nH_2O \rightarrow M(OH)_n + nH^{+} + ne^{-}$
(c) Evolução do hidrogênio (meio ácido desaerado)	$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$
(d) Redução do oxigênio (meio ácido aerado)	$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$
(e) Redução do oxigênio (meio básico ou neutro aerado)	$O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$
(f) Redução do íon do metal (presença de íons na solução em estado mais oxidado)	$M^{+n} + e^{-} \rightarrow M^{+(n-1)}$
(g) Deposição do metal (redução de íons de metal mais nobre)	$M^{+n} + ne^{-} \rightarrow M^0$

Fonte: Adaptado de Mello (2011)

3.3.1.2. Natureza química do produto corrosão

Conforme muito bem explicado por Gentil (2011), o produto de corrosão será formado pelos íons resultantes das reações anódicas e catódicas



Exemplificando com ferro, têm-se:

- reação anódica



- produto de corrosão

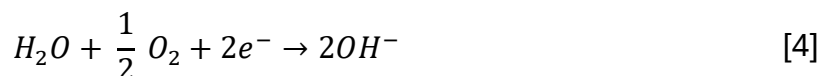


É oportuno destacar a importância da presença do eletrólito no processo eletroquímico de corrosão. Embora, na maioria dos casos, não apareça no produto de corrosão o sal usado como eletrólito, é fundamental a sua presença para se ter a corrosão. Daí em atmosferas marinhas a corrosão ser muito mais severa do que em atmosferas rurais. Em instalações sujeitas a condições atmosféricas, observam-se, no produto de corrosão, sais insolúveis do eletrólito

existente na atmosfera. Assim, em atmosferas marinhas é comum a presença de cloreto básico de ferro (III), $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{Cl}$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot \text{FeCl}_3$, que é insolúvel, e em atmosferas industriais se encontra o sulfato básico de ferro (III), $\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, também insolúvel, ou FeOHSO_4 .

Considerando-se o caso do ferro imerso em solução aquosa de cloreto de sódio como eletrólito, podem-se admitir as reações:

- anodo
equação [2], ou seja, $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e^-$
- área catódica



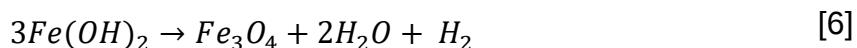
Os íons metálicos, Fe^{2+} , migram em direção ao catodo e os íons hidroxilas, OH^- , migram em direção ao anodo, e numa região intermediária esses íons se encontram formando o $\text{Fe}(\text{OH})_2$, hidróxido de ferro (II) ou hidróxido ferroso



Verifica-se, então, que na corrosão eletroquímica o metal se oxida num lugar, o oxidante se reduz em outro e o produto de corrosão se forma em regiões intermediárias, não apresentando, portanto, características protetoras.

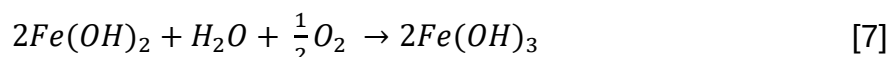
O $\text{Fe}(\text{OH})_2$ formado sofre transformações e, de acordo com o teor de oxigênio presente, pode-se ter:

- em meio deficiente de oxigênio, formação de magnetita

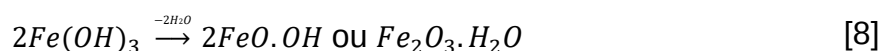


onde Fe_3O_4 = magnetita (verde = hidratada e preta = anidra)

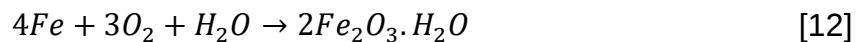
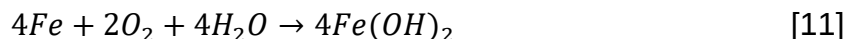
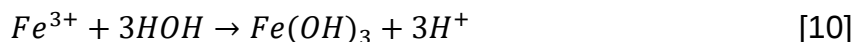
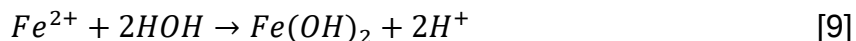
- em meio aerado, que o caso mais frequente, tem-se a oxidação do $\text{Fe}(\text{OH})_2$, resultando o hidróxido férrico ou hidróxido de ferro (III)



ou



Podem-se também escrever as equações das reações da seguinte maneira:



As reações explicam as colorações encontradas na corrosão atmosférica do ferro ou suas ligas, onde se observa que o produto de corrosão, ou ferrugem, apresenta na parte inferior, isto é, aquela em contato imediato com o metal, coloração preta, da magnetita, Fe_3O_4 , e, na parte superior, aquela em contato com mais oxigênio, apresenta coloração alaranjada ou castanho-avermelhada típica do $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ou $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ (n = número de moléculas de água).

3.4. MÉTODOS DE CONTROLE DA CORROSÃO

A corrosão é um fenômeno interfacial, ou seja, ocorre na interface metal/meio. Assim, o controle da corrosão será baseado nos métodos que, de alguma forma, atuem no metal, na interface ou no meio. Portanto, o controle da corrosão se baseia em pelo menos em um dos seguintes métodos: Seleção de materiais e projeto adequado, modificação da interface, modificação do meio ou aplicação de métodos eletroquímicos (JAMBO e FÓFANO, 2008).

Ainda segundo Jambo e Fófano (2008), para o controle da corrosão é possível realizar a monitoração da corrosão basicamente através de três métodos:

1. Métodos analíticos, que se baseiam na medição de íons ou substâncias que de alguma forma estão associados à corrosão;
2. Métodos de ensaios não destrutivos, que também podem ser um valioso método de monitoração da corrosão, pois podem indicar a perda de espessuras ou outros danos oriundos do processo corrosivo; como métodos podem ser citados: ultrassom, correntes parasitas, radiografia, partículas magnéticas e termografia;
3. Métodos corrosionais, os quais são divididos em não eletroquímicos e eletroquímicos, onde o primeiro baseia-se na perda de massa de espécimes

propriamente projetadas, que podem indicar diretamente ou não, a taxa de corrosão do sistema estudado e dividem-se em cupons, sensores de resistência elétrica e sentinela; o segundo baseia-se em medidas eletroquímicas tomadas diretamente no fluido de processo e podem ser medidas de potencial, extrapolação de retas de Tafel, resistência de polarização linear, amperimetria de resistência nula, impedância eletroquímica, análise harmônica, ruído eletroquímico e medidas de permeação de hidrogênio.

3.4.1. Métodos de controle da corrosão eletroquímica

Dentre os vários métodos de combate e controle da corrosão eletroquímica, podemos destacar os quatro métodos mais utilizados na indústria conforme mostrado abaixo:

1. Ligas metálicas especiais: dentre os quatro métodos principais, esse é o método menos utilizado na indústria, uma vez que possui alto custo e limitações em sua aplicação. O aço inoxidável é uma liga metálica especial feita de 74% de aço, 18% de cromo e 8% de níquel, que possui como propriedade principal o fato de não “enferrujar”. Os metais cromo e níquel formam óxidos insolúveis que protegem o aço do oxigênio e da umidade do ar.
2. Revestimentos protetores: são formados por três grandes grupos:
 - revestimentos metálicos – podendo ser aplicados por cladeamento, imersão a quente, metalização, redução química, deposição em fase gasosa (*CVD: Chemical Vapor Deposition*), evaporação a vácuo, cementação e eletrodeposição;
 - revestimentos inorgânicos não-metálicos – que são divididos em os que são produtos de reações com o metal substrato (como a cromatização e a fosfatização), e os que são depositados diretamente sobre o metal substrato (como silicetos, carbetos, esmaltes vitrosos e vidros);
 - revestimentos orgânicos – que, sobre a quantidade total em massa dos revestimentos, são os mais importantes (tintas, elastômeros e polímeros).

3. Inibidores de corrosão: conhecido como um método de controle pela influência do meio, os inibidores de corrosão são substâncias que adicionadas em pequenas quantidades a um sistema metal/meio diminuem a velocidade de corrosão do metal. Existem três grandes classes de inibidores:
- inibidores formando um filme protetor sobre o metal (inibidores anódicos e inibidores catódicos). Quando aplicados nos anodos reagem geralmente com o produto de corrosão formando um filme aderente, insolúvel e protetor sobre as áreas anódicas – o potencial de corrosão do metal se torna mais positivo e a densidade de corrente de corrosão diminui. Quando aplicados nos catodos consiste na deposição de uma película na superfície catódica polarizando o catodo e diminuindo o potencial de corrosão e a velocidade de corrosão do metal;
 - inibidores de adsorção (sabões de metais pesados – sais de ácidos graxos como ácido palmítico, ácido esteárico e ácido oléico – coloídeos e moléculas orgânicas contendo O, N, S, Se, P). O inibidor deve não só se adsorver do ponto de vista químico, mas também na faixa de potenciais que inclui o potencial de corrosão; e
 - inibidores em fase vapor (os mais usados são o nitrito de dicitlohexilamônio e o carbonato de ciclohexilamônio). Esses inibidores são usados como método de proteção temporária contra a corrosão pela umidade de produtos metálicos durante a estocagem e o transporte.
4. Proteção catódica: conhecido como um método de controle pela influência no metal, a proteção catódica, parte do objeto deste trabalho e, já devidamente definida anteriormente, funciona agindo sobre o potencial do metal. É o método mais utilizado para proteção de estruturas e tubos submersos e subterrâneos.

Tabela 4 - Série de atividade de metais em solução aquosa

Metal	Reação de Oxidação				
Lítio	Li(s)	$\longrightarrow$	$\text{Li}^+(\text{aq})$	+	e^-
Potássio	K(s)	$\longrightarrow$	$\text{K}^+(\text{aq})$	+	e^-
Bário	Ba(s)	$\longrightarrow$	$\text{Ba}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Cálcio	Ca(s)	$\longrightarrow$	$\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Sódio	Na(s)	$\longrightarrow$	$\text{Na}^+(\text{aq})$	+	e^-
Magnésio	Mg(s)	$\longrightarrow$	$\text{Mg}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Alumínio	Al(s)	$\longrightarrow$	$\text{Al}^{3+}(\text{aq})$	+	3e^-
Manganês	Mn(s)	$\longrightarrow$	$\text{Mn}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Zinco	Zn(s)	$\longrightarrow$	$\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Cromo	Cr(s)	$\longrightarrow$	$\text{Cr}^{3+}(\text{aq})$	+	3e^-
Ferro	Fe(s)	$\longrightarrow$	$\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Cobalto	Co(s)	$\longrightarrow$	$\text{Co}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Níquel	Ni(s)	$\longrightarrow$	$\text{Ni}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Estanho	Sn(s)	$\longrightarrow$	$\text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Chumbo	Pb(s)	$\longrightarrow$	$\text{Pb}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Hidrogênio	$\text{H}_2(\text{g})$	$\longrightarrow$	$2\text{H}^+(\text{aq})$	+	2e^-
Cobre	Cu(s)	$\longrightarrow$	$\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Prata	Ag(s)	$\longrightarrow$	$\text{Ag}^+(\text{aq})$	+	e^-
Mercúrio	Hg(l)	$\longrightarrow$	$\text{Hg}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Platina	Pt(s)	$\longrightarrow$	$\text{Pt}^{2+}(\text{aq})$	+	2e^-
Ouro	Au(s)	$\longrightarrow$	$\text{Au}^{3+}(\text{aq})$	+	3e^-



A facilidade de oxidação aumenta

Fonte: Brown, Lemay e Bursten (2005)

3.4.1.1. Proteção catódica por corrente impressa

Conforme já explicado anteriormente, a proteção catódica por corrente impressa é um método utilizado para proteger estruturas metálicas submersas ou enterradas contra a corrosão eletroquímica. Nesse método, uma corrente elétrica é aplicada à estrutura metálica, o que faz com que ela se torne o catodo e se proteja contra a corrosão.

A corrente elétrica é fornecida por um retificador – que transforma a corrente alternada da fonte de alimentação em corrente contínua e controla a intensidade da corrente impressa na estrutura – e circula no sistema através do eletrólito (íons de sais dissolvidos na água) que estão contidos no mar (estruturas submersas) ou no solo (estruturas enterradas).

Esse método é comumente utilizado em estruturas submersas, como plataformas de petróleo e navios, e em estruturas enterradas, como tubulações de gás e petróleo, tanques de armazenamento entre outros.

A proteção catódica por corrente impressa é altamente eficiente e pode prolongar a vida útil das estruturas metálicas protegidas por muitos anos. No entanto, é importante garantir que o sistema de proteção seja projetado e mantido corretamente, para que a corrente elétrica seja distribuída uniformemente na estrutura e para que não ocorram falhas no sistema de proteção.

A proteção catódica por corrente impressa é um sistema complexo que requer a utilização de vários componentes para garantir sua eficácia. Por mais que seus principais componentes já tenham sido descritos no início do trabalho, é importante mencioná-los novamente:

- Retificador: é o componente que transforma a corrente alternada da fonte de alimentação em corrente contínua, que será utilizada para proteger a estrutura metálica. Ele também controla a intensidade da corrente a ser impressa na estrutura.
- Anodos: são os componentes que fornecem os elétrons para a estrutura metálica a ser protegida. Os anodos devem ser altamente resistentes (inertes) à corrosão. Os mais utilizados são os de Ferro-Silício-Cromo e os de Titânio.
- Sistema de aterramento: é utilizado para garantir que a corrente elétrica seja distribuída uniformemente na estrutura metálica a ser protegida.
- Cabos e conexões: são utilizados para conectar os anodos, o sistema de aterramento, o sistema de controle e a estrutura metálica a ser protegida.
- Revestimentos e isolamentos: são utilizados para proteger a estrutura metálica a ser protegida contra a corrosão eletroquímica e para garantir que a corrente elétrica seja distribuída uniformemente na estrutura.
- Sistema de controle: é utilizado para monitorar e controlar a corrente elétrica que está sendo impressa na estrutura. Ele pode incluir dispositivos como medidores de corrente e potencial, interruptores, relés e controladores de automação. Esse é o objetivo principal do trabalho. Desenvolver um sistema de controle didático que simule

através do uso de *softwares* computacionais a intervenção automática em um retificador de corrente impressa para proteção catódica.

É importante que esses componentes sejam projetados, instalados e mantidos corretamente, para garantir a eficácia da proteção contra a corrosão.

3.4.1.1.1. Dimensionamento do sistema de proteção catódica por corrente impressa

Para se ter um sistema de proteção catódica efetivo é necessário fazer um bom dimensionamento dos dois elementos cruciais, os anodos e a corrente de proteção. De acordo com Ribeiro (2012), temos as seguintes definições.

1. Anodos: quando enterrados no solo, os anodos devem ser envolvidos por um enchimento condutor de coque moído de resistividade máxima de $100\Omega.m$ para facilitar a passagem da corrente dos anodos para o solo e para diminuir o desgaste do anodo. A resistência total do circuito é dada pela relação

$$R_t = \frac{\Delta V}{I} \quad [13]$$

Onde:

- ΔV : tensão de saída do retificador;
- I : corrente de cada conjunto retificador/leito de anodos.

O dimensionamento do anodo ou do leito de anodos inertes é dado por

$$V = \frac{M * 0,85}{D * I} \quad [14]$$

Onde:

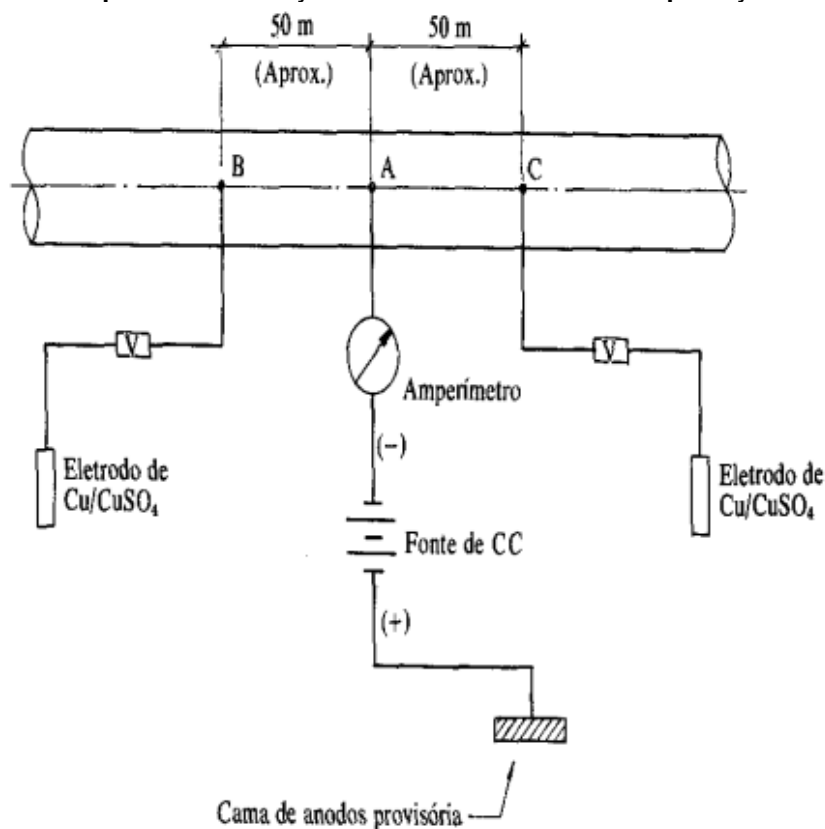
- V : vida dos anodos (ano);
- M : massa total dos anodos (kg);
- D : desgaste esperado dos anodos (kg/A*ano) – vide Tabela 4;
- I : corrente (A);
- 0,85: fator de utilização dos anodos.

Tabela 5 – Corrente recomendada e desgaste esperado para os anodos inertes

Anodo	I recomendada ($A.m^{-2}$)	Desgaste esperado (kg/A.ano)
Grafite	3-5	0,4
Fe-Si	10-15	0,2
Fe-Si-Cr	10-15	0,4 (em água do mar)
Pb-Sb-Ag	50-100	0,1
Ti platinizado	até 500	-

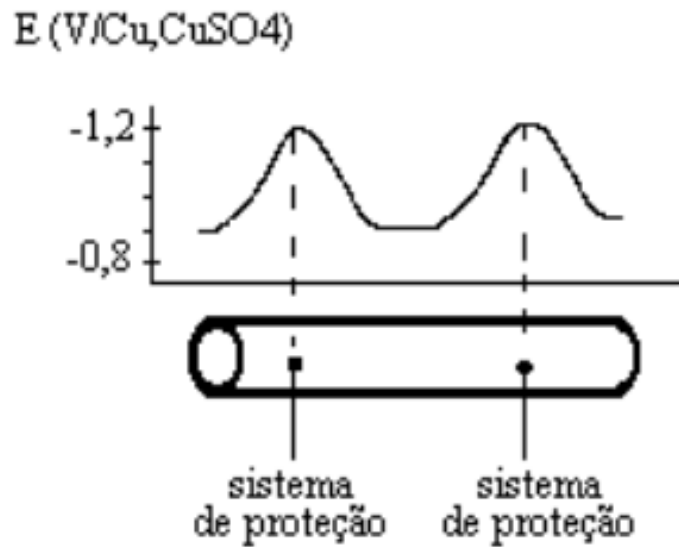
Fonte: Adaptado de Ribeiro (2012)

2. Corrente de proteção: Quando a estrutura já está instalada, devem ser feitos testes para a determinação da corrente necessária para ter proteção, conforme mostrado na Figura 7. Os potenciais nos pontos B e C devem estar na faixa dos potenciais de proteção indicada ($< -0,85V/Cu, CuSO_4$ em solo e $< -0,80 V/Ag, AgCl$ em água). Geralmente há uma dependência do potencial da estrutura com a distância à região onde são posicionados os anodos, conforme mostrado na Figura 8. É necessário que todos os pontos da estrutura estejam na faixa de potenciais de proteção.

Figura 7 – Teste para determinação da corrente necessária à proteção da estrutura

Fonte: Ribeiro (2012)

Figura 8 – Distribuição do potencial ao longo de uma estrutura em função da posição dos anodos



Fonte: Ribeiro (2012)

Quando a estrutura não foi ainda instalada, a determinação da corrente necessária para a proteção, a escolha do sistema de proteção catódica a ser utilizado bem como seu dimensionamento podem ser determinados a partir de métodos empíricos, conforme abaixo:

$$I_o = A * D_c * F * (1 - E) \quad [15]$$

Com

$$D_c = 73,73 - 13,35 \log \rho \quad [16]$$

Onde:

- I_o : corrente elétrica mínima para proteção (mA);
- A : área a ser protegida (m²);
- D_c : densidade da corrente elétrica (mA/m²);
- ρ : resistividade do solo ($\Omega \cdot \text{cm}$);
- F : fator de correção da velocidade do fluido;
- E : eficiência do revestimento da tubulação.

Os valores de F e E são apresentados nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 6 – Fator F de correção da velocidade do fluido

velocidade (ms^{-1})	1	2	3	4	5	6	≥ 7
F	1,00	1,11	1,17	1,22	1,24	1,25	1,27

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2012)

Tabela 7 – Eficiência do revestimento da tubulação (E)

Estrutura	Qualidade do revestimento	E (%)
tubulações enterradas ou imersas	excelente	90-95
	boa	80-90
	regular	50-80
	ruim	0-50
fundo de tanques (parte externa)	bom	60-80
	regular	40-60
	ruim	0-40
fundo de tanques (parte interna)	excelente	90-95
embarcações	excelente	90-95
	bom	80-90
	regular	50-80
	ruim	0-50

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2012)

4. METODOLOGIA

O projeto do sistema de proteção catódica deve fazer parte do projeto global do duto e do gerenciamento da sua corrosão. O primeiro passo para um projeto é levantar e avaliar os dados relativos à estrutura, suas características operacionais e ambientais (GERVÁSIO, 2013). Cada tipo de solo possui uma resistividade diferente e, como um mesmo duto passa por vários solos distintos, isso afeta a resistência equivalente do circuito que precisa ser protegido, e isso deve ser levado em consideração no momento de definir o dimensionamento inicial da proteção catódica. Como o mesmo solo pode sofrer variações muito significativas em suas magnitudes ao longo do tempo (de mais de 400%), influenciadas principalmente pela umidade, o sistema deve permitir a variação de corrente elétrica fornecida, de forma a efetivamente garantir a proteção do duto. Portanto, o presente projeto visa adequar a corrente de saída do retificador ao sistema formado pelo duto, pelo leito de anodos e o solo.

4.1. DETALHE DO PROBLEMA

Conforme já apresentado na seção 1.1, um estudo feito pelo Sr. José Leonardo Resende e apresentado na INTERCORR (*International Corrosion Congress*) 2018 – maior congresso brasileiro sobre corrosão, organizado pela ABRACO (Associação Brasileira de Corrosão) – mostra que a resistividade do solo medida na GASMIG, na unidade CD-RMBH (Centro de Distribuição da Região Metropolitana de Belo Horizonte) variou em 453% ao longo de um ano (entre agosto de 2014 e julho de 2015). Esse é o principal motivo que demanda a ida de técnicos a campo, pois o sistema de proteção catódica que está em operação atualmente opera em malha aberta, ou seja, ele não percebe as alterações que ocorrem no decorrer do tempo. Dessa forma, a compensação da variação da resistividade do solo é realizada manualmente *in loco*, alterando-se o TAP do transformador ao qual o retificador está conectado, aumentando ou reduzindo o valor de tensão que será retificada e aplicada no sistema formado pelo duto, pelo leito de anodos e o solo. Como já foi dito, isso implica em custos financeiros para a GASMIG e exposições de seus técnicos a riscos que poderiam ser evitados.

Foto 2 - Retificador de corrente impressa



Fonte: Acervo de fotos da GASMIG (2017)

4.2. CENÁRIO

No caso da GASMIG, o sistema de proteção catódica é aplicado em seus gasodutos feitos de aço carbono (também há gasodutos feitos de PEAD – Polietileno de Alta Densidade – que, por ser um material plástico, não demanda de proteção catódica). Atualmente esses gasodutos somam um pouco mais de 848 km espalhados em 4 regiões de Minas Gerais e atendidas pelos seus respectivos Centros de Distribuição, conforme demonstrado abaixo.

- CD-RMBH: Região Metropolitana de Belo Horizonte. A sede administrativa da Companhia fica em Belo Horizonte e a sede operacional fica em Contagem;
- CD-VACO: Região do Vale do Aço. A sede operacional fica em Ipatinga;

- CD-MANT: Região da Mantiqueira. A sede operacional fica em Juiz de Fora;
- CD-SULM: Região do Sul de Minas. A sede operacional fica em Poços de Caldas.

Como se pode observar, são regiões muito distintas entre si em todos os aspectos, inclusive em se tratando de solo. Cada tipo de solo tem sua particularidade e, conseqüentemente, sua resistividade. A mudança do tipo de solo influencia e afeta a resistência equivalente do circuito de proteção catódica e isso define o dimensionamento do circuito, realizado por uma equipe dedicada na GASMIG.

Em sua maioria, os sistemas de proteção catódica em operação atualmente na GASMIG apresentam baixa potência de saída, com a resistência equivalente vista nos terminais de saída do retificador apresentando valores de no máximo 40 Ω e necessidade de correntes elétricas de até 1 A.

4.3. SOLUÇÃO PROPOSTA

Este trabalho teve como foco o desenvolvimento de um projeto simulado de fornecimento estabilizado da corrente elétrica para um sistema de Proteção Catódica por Corrente Impressa, mais especificamente uma proposta de automatização desse tipo de sistema manual, buscando garantir uma operação mais confiável, que reduza custos de constantes intervenções humanas e com possibilidade de supervisão à distância.

O projeto será executado em etapas, conforme apresentado a seguir:

- Etapa 1: Estudo de bibliografias sobre os temas: corrosão, processos de combate à corrosão, proteção catódica, proteção catódica por corrente impressa, retificadores de corrente impressa, desenvolvimento de projetos via *softwares* de simulações computacionais, desenvolvimento de telas de uma IHM, comunicação entre diferentes *softwares* via porta serial (UART), monitoramento de grandezas via *web*.
- Etapa 2: Desenvolvimento teórico/modelagem do sistema de um retificador de corrente impressa.

- Desenvolver um projeto de simulação computacional simples que contenha as características principais de um sistema de proteção catódica por corrente impressa.
- Desenvolver códigos computacionais para o fornecimento de diferentes tensões VDC a um sistema de proteção catódica em razão da variação da resistividade elétrica do solo, sendo esta resistividade simulada por um potenciômetro.
- Desenvolver código para receber e interpretar a leitura dos dados de corrente elétrica medidos pelo sensor ACS712-20A.
- Desenvolver código que seja capaz de verificar quando houve alteração nos dados de corrente elétrica.
- Desenvolver código para envio dos dados atualizados em tempo real de corrente elétrica, resistência elétrica e tensão aplicada no sistema de proteção catódica para exibição em uma IHM.
- Desenvolver uma IHM objetiva, de simples manuseio e intuitiva que seja capaz de operar o sistema de proteção catódica recebendo, tratando e exibindo os dados “de campo”.
- Desenvolver código capaz de configurar o módulo Wi-Fi a criar uma rede de acesso própria e em seguida ser capaz de enviar os dados medidos para o aplicativo *web*.
- Desenvolver um aplicativo *web* que receba as informações geradas pelo controle.
- Etapa 3: Simulação do sistema completo.
- Etapa 4: Testes do sistema em laboratório e análise de resultados
- Etapa 5: Escrita e apresentação de monografia.

4.3.1. Programas utilizados

Para o desenvolvimento deste projeto, serão usados basicamente 5 *softwares* computacionais, conforme apresentado a seguir.

4.3.1.1. *Proteus Design Suite*

Proteus Design Suite é um dos principais *softwares* para criação de projetos eletrônicos disponíveis no mercado. O *Proteus* tem vantagens sobre outras ferramentas como *VMLab* e *Atmel Studio* (seus principais concorrentes), porque fornece simulação mais rápida de portas seriais externas. Pode-se também trabalhar com drivers comerciais usando *Proteus*. Por não precisar de nenhum *hardware* adicional, ele é bastante usado como uma ferramenta de treinamento ou de ensino sendo, inclusive, utilizado durante quase todo o curso de Engenharia de Controle e Automação do IFMG – Campus Betim. Além disso, ele possui simulações suportadas para todos os principais fornecedores de MCUs do mundo (*Atmel*, *Microchip Technology*, *NXP*, *Parallax* e *Texas Instruments*).

A montagem do projeto está disponível no capítulo 5. DESENVOLVIMENTO.

O *Proteus Design Suite* é desenvolvido pela empresa *Labcenter Electronics Ltd.* em Yorkshire (Inglaterra).

4.3.1.2. *mikroC PRO for PIC*

mikroC PRO for PIC é um programa que permite escrever códigos para dispositivos PIC e os compilar usando técnicas avançadas de otimização, contendo abrangentes bibliotecas de *softwares* e *hardwares* incorporadas. Ele foi utilizado porque o MCU escolhido para o projeto foi o PIC (18F45K22) e pela familiaridade com o uso desse programa, uma vez que ele também é bastante utilizado durante todo o curso de Engenharia de Controle e Automação do IFMG – Campus Betim. A grande vantagem desse programa é que ele permite escrever um código para MCU em linguagem C, o que traz grandes vantagens sobre escrevê-lo em *Assembly*, já que não é necessário alternar entre bancos de registradores. Mas a vantagem mais importante é que C é mais fácil de usar, manter, entender e compartilhar.

O código fonte do projeto está disponível no APÊNDICE A.

O *mikroC* é desenvolvido pela empresa *MikroElektronika* – ou simplesmente *MikroE* – em Belgrado (Sérvia).

4.3.1.3. COM0COM

O COM0COM é um *software* que permite criar pares de portas de comunicação virtual em um sistema operacional *Windows*. Essas portas virtuais podem ser usadas para emular a comunicação serial entre dois dispositivos, como se eles estivessem fisicamente conectados por um cabo serial.

O COM0COM funciona criando um par de portas virtuais, onde uma delas é considerada a porta "*master*" (mestre) e a outra é a porta "*slave*" (escravo). Os dados transmitidos pela porta *master* são recebidos pela porta *slave* e vice-versa, simulando a comunicação serial.

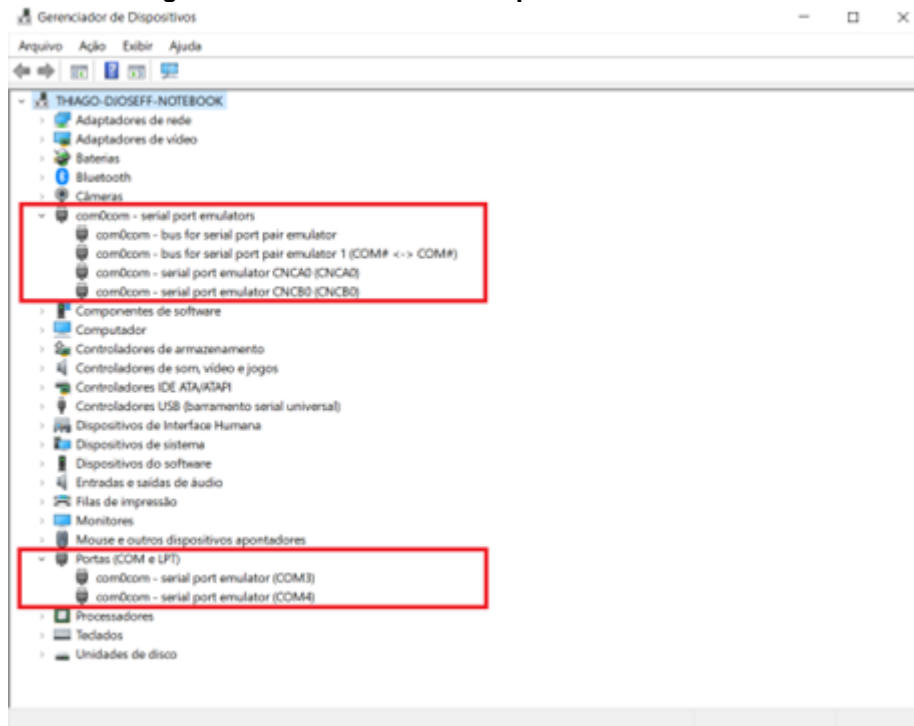
Esse *software* é muito útil para desenvolvedores e engenheiros que precisam testar aplicações que se comunicam via porta serial, sem ter que conectar fisicamente os dispositivos. Com o COM0COM, é possível simular a comunicação entre dispositivos em um ambiente controlado, sem a necessidade de equipamentos adicionais.

Em resumo, o COM0COM é um *software* que permite criar pares de portas virtuais para simular a comunicação serial entre dispositivos. É uma ferramenta útil para testar aplicações que se comunicam via porta serial, sem a necessidade de equipamentos adicionais.

Durante o desenvolvimento do projeto foi utilizado o COM0COM para criar as portas virtuais COM3 e COM4, usadas para comunicação serial entre *Proteus* (COM4) e *Nextion Editor* (COM3).

O COM0COM é desenvolvido pela empresa *Sysprogs Software Inc.* em *Vancouver* (Canadá).

Figura 9 – Gerenciador de Dispositivos do Windows



Fonte: PC do autor (2023)

4.3.1.4. Nextion Editor

Nextion Editor é o programa de desenvolvimento do *display Nextion*. Ele pode desenvolver rapidamente uma IHM GUI arrastando e soltando componentes (gráficos, texto, botão, *slider*, etc.) e instruções baseadas em texto ASCII para codificar como os componentes interagem.

IHMs e GUIs são diferentes, e a principal diferença é seu escopo (conforme explicação abaixo). No entanto, o *display Nextion* possui as duas ferramentas simultâneas, o que o torna uma IHM bastante poderosa, mesmo tendo um custo considerado baixo se comparado ao custo de IHMs disponíveis no mercado.

- GUI: é uma interface que usa recursos visuais para permitir que um usuário trabalhe com um computador, permitindo que os usuários naveguem pelos menus e opções enquanto o código e os comandos reais são executados em segundo plano. Uma GUI funciona em primeiro plano, recebendo entradas e comandos do usuário, que podem ser via teclado, mouse, telas sensíveis ao toque ou outras mídias. O programa de computador e o sistema operacional

traduzem esses comandos em ações que afetam as informações e as configurações do computador. Por possuir um processador interno, o *Nextion* possui funções de GUI.

- IHM: é um dispositivo que, como o nome sugere, possibilita a interação entre humanos e máquinas. Dentro do contexto industrial, uma IHM permite ensinar, manipular e solucionar problemas de robôs e equipamentos automatizados. Quase todas as novas máquinas usadas na manufatura, petróleo e gás, alimentos e bebidas, energia e outros setores são equipadas com IHMs. Na maioria das configurações, as IHMs se comunicam diretamente com o controlador principal, geralmente um CLP. Muitos IHMs modernos são operados por tela sensível ao toque, que está rapidamente se tornando um padrão da indústria. IHMs com tela sensível ao toque exibem botões, funções e mensagens em uma única tela que pode receber entradas e fornecer *feedback* como uma saída. E é exatamente isso que o *Nextion* faz.

O *Nextion Editor* oferece uma maneira fácil de criar uma interface de usuário de toque intuitiva, mesmo para iniciantes. É possível adicionar uma imagem estática como plano de fundo, definir funções por componentes e, portanto, criar uma GUI simples em minutos. Os componentes são fáceis de arrastar e soltar e as instruções simples baseadas em texto ASCII reduzem drasticamente as cargas de trabalho de desenvolvimento de projetos de IHM.

A escolha pelo *Nextion Editor* é pelo fato de que o IFMG – Campus Betim também vem trabalhando com esse programa há alguns anos, por se tratar de um *software* poderoso, gratuito, de simples manuseio, focado em MCUs e, principalmente, de fácil interação com o *Proteus Design Suite*.

As telas desenvolvidas para esse projeto estão devidamente explicadas no APÊNDICE B.

O *Nextion Editor* é desenvolvido pela empresa *ITEAD Intelligent Systems Co.,Ltd* em *Shenzhen* (China).

4.3.1.5. Virtuino

Virtuino é uma ferramenta IHM para plataformas IoT, Arduino, ESP8266, ESP32 e placas similares, corretores MQTT, CLPs e módulos Modbus. Ele é um aplicativo Android para monitorar sensores ou controlar dispositivos elétricos via Bluetooth, Wi-Fi local ou Internet. Ele foi escolhido por sua simplicidade e eficiência. Ele trabalha muito bem com o ESP8266, que é o módulo Wi-Fi de baixo custo mais usado no mundo e que será o responsável por enviar os dados medidos para o aplicativo *web*.

A tela do aplicativo *web*, acompanhada de suas devidas explicações e programações, está disponível no capítulo 5.

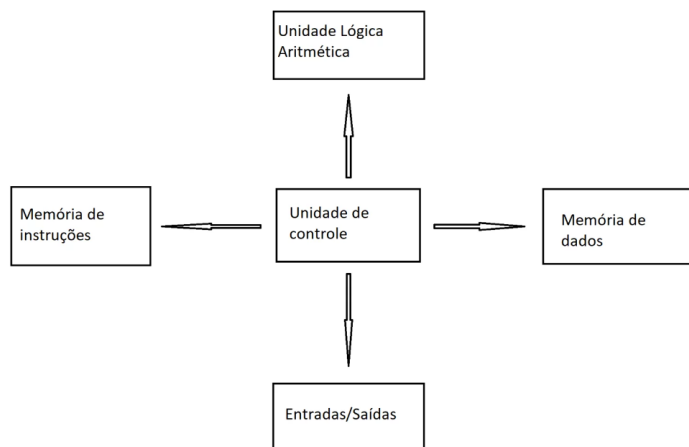
O *Virtuino* é desenvolvido pelo desenvolvedor *Ilias Lamprou* de *Aneza* (Grécia).

4.3.2. Dispositivos utilizados

4.3.2.1. PIC 18F45K22

PIC é o nome dado pela empresa *Microchip Technology Inc.* aos seus MCUs e significa *Programmable Interface Controller* (Controlador de Interface Programável) e, como o próprio nome sugere, trata-se de um componente manipulável capaz de controlar outros objetos eletrônicos. Todos os PIC's são descendentes do PIC1650 e possuem uma arquitetura *Harvard*, que tem como principal característica o acesso à memória de dados de modo separado da memória de programa.

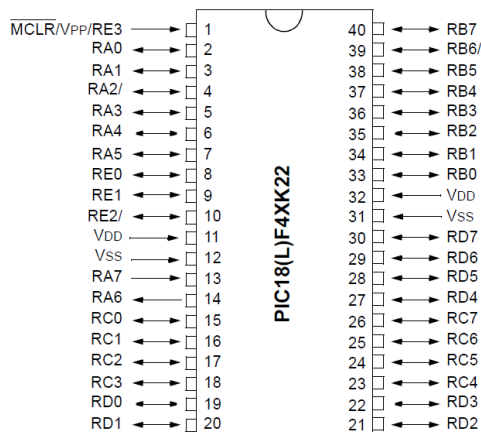
Figura 10 – Esquemático da Arquitetura Harvard



Fonte: <https://blog.eletragate.com/introducao-aos-microcontroladores-pic-parte-1/> (2023)

O modelo escolhido foi da família 18F com 40 pinos, uma vez que ele possui quantidade suficiente de pinos para a implementação de todas as operações necessárias para o funcionamento do projeto. O diagrama de pinos está representado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de pinos do PIC 18F45K22



Fonte: Datasheet PIC 18(L)F2X/4XK22 (2010)

Além disso, a família 18F tem como características principais o alto desempenho e o baixo consumo de energia, além de possuir um conjunto periférico robusto. Eles possuem *enhanced flash*, que permite ao usuário resultados mais confiáveis já que executam de 10 a 100 vezes mais operações de *read/write* (leitura/escrita) e são menos propensos a falhas e com menos corrente operante, apresentando uma relação tensão/temperatura melhorada através do uso da *nanoWatt Technology* (Tecnologia nanoWatt).

O PIC18F45K22 foi escolhido por ser robusto, confiável, de alta performance, de fácil acesso, de baixo custo (cerca de R\$ 20,00), programável em linguagem C, estar disponível na biblioteca do *Proteus Design Suite* e, principalmente, por possuir dois canais serial UART (UART1 e UART2) e isso faz toda diferença entre ele e outros MCUs da família 18F, já que é possível uma comunicação exclusiva do MCU com a IHM (através de um canal) e outra comunicação exclusiva do MCU com o aplicativo *web* (através do segundo canal).

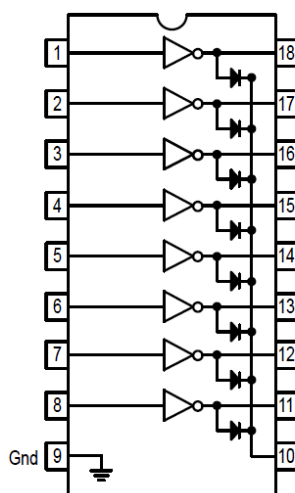
O *datasheet* do PIC18F45K22 encontra-se em anexo.

4.3.2.2. CI ULN2803

O ULN2803 trata-se de um moderno e compacto Circuito Integrado utilizado para as mais diversas finalidades.

Na maioria dos casos os CIs como, por exemplo, o ULN2803, fazem parte de circuitos maiores, operando em total sincronia com as demais peças do sistema, recebendo sinais eletrônicos e ordenando determinadas ações. O ULN2803 pode ser aplicado em diversos modelos de placa, possuindo 18 terminais para conexão conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama de pinos do ULN2803



Fonte: Datasheet ULN2803/ULN2804 (1996)

Para controlar no MCU componentes que exigem maior tensão ou corrente, como leds de alta potência, relés, solenoides, motores CC unidirecionais, entre outros, é necessário recorrer a intermediários capazes de fazer a ligação entre a baixa capacidade de tensão e corrente do MCU, e as demandas do circuito que está sendo controlado. Dessa forma, o CI ULN2803 foi escolhido pois ele tem baixo custo (cerca de R\$ 5,00), é fácil de conectar e programar, está disponível na biblioteca do *Proteus Design Suite* e permite que o MCU controle de maneira simples 8 portas de um circuito de até 50V de alimentação.

O *datasheet* do CI ULN2803 encontra-se em anexo.

4.3.2.3. Relés

O relé é um interruptor eletromecânico, cuja movimentação física desse interruptor ocorre quando a corrente elétrica percorre as espiras da bobina do relé, criando assim um campo eletromagnético que por sua vez atrai a alavanca responsável pela mudança do estado dos contatos. De forma geral o funcionamento dos relés é bem simples, pois quando uma corrente circula pela bobina, ela gera um campo eletromagnético que acaba atraindo uma série de contatos, fechando ou abrindo os circuitos. Quando a corrente elétrica que passa pelas bobinas é interrompida, o campo eletromagnético também é interrompido, ou seja, os contatos voltam para suas posições originais.

Como as saídas digitais do MCU fornecem 5 VDC para nível lógico alto (quando ligadas), os relés escolhidos são de 5 VDC (isso significa que suas bobinas são acionadas quando recebem essa tensão vinda do MCU), com capacidade de acionar cargas de até 15 A em 125 VAC. Por ser um componente básico de eletroeletrônica, tem baixo custo (cerca de R\$ 7,00) e um exemplo é mostrado na Foto 3.

Foto 3 – Módulo Relé 5 VDC

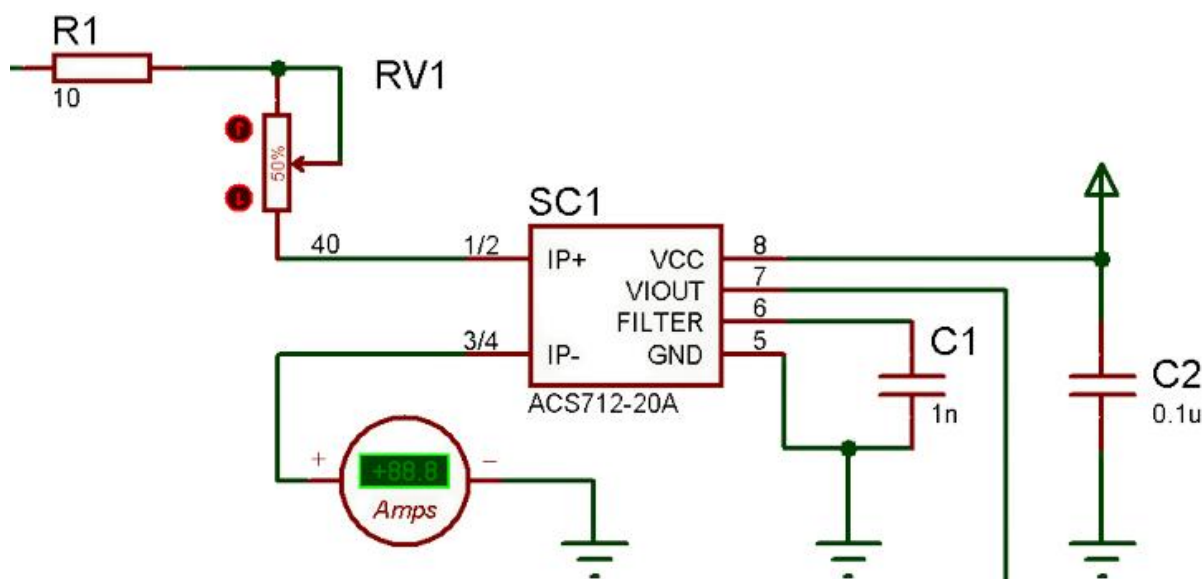


Fonte: <https://www.baudaeletronica.com.br/modulo-rele-5v.html> (2023)

4.3.2.4. Sistema Duto-Solo

Por se tratar de um projeto simulado, o sistema duto-solo foi desenvolvido de forma simples através do uso de 4 componentes eletrônicos – resistor, resistor variável (potenciômetro), sensor de corrente e capacitor – e por 1 instrumento de medição – amperímetro – conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Simulação de um sistema duto-solo



Fonte: Projeto elaborado pelo autor (2023)

4.3.2.4.1. Resistor

Os resistores são componentes passivos que compõem os circuitos elétricos, cuja finalidade é basicamente limitar o fluxo de corrente elétrica em um determinado circuito, além de realizar a conversão de energia elétrica em energia térmica através do efeito Joule. Pelo fato de os resistores oferecerem uma resistência à passagem de corrente elétrica, a sua principal grandeza é a resistência elétrica, que possui a unidade de medida dada em ohm (Ω).

No projeto, foi escolhido um resistor de 10 Ω para simbolizar a resistência mínima do solo.

Foto 4 – Resistor de 10 Ω 

Fonte: <https://www.eletrogate.com/> (2023)

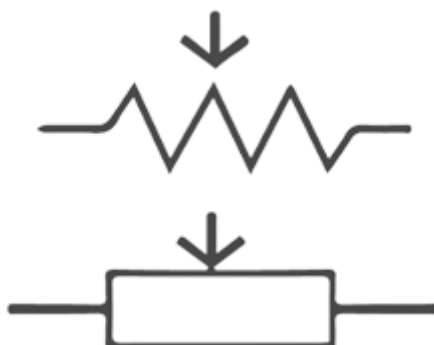
4.3.2.4.2. Resistor Variável (Potenciômetro)

O resistor variável é um dispositivo cujos valores de resistência podem ser alterados. Essa variação pode se dar tanto através de intervenções mecânicas, como girar um eixo ou um botão, ou ainda ser sensível a variações do meio ambiente, por exemplo.

O potenciômetro é o tipo mais comum de resistor variável. Normalmente possui três terminais, variando a sua potência de acordo com a relação estabelecida entre eles através de um eixo. A resistência nominal de um potenciômetro é referente a resistência máxima que este oferece, variando de zero até este valor.

No projeto, foi escolhido um resistor variável (potenciômetro) de 40 Ω para simbolizar a variação da resistência do solo, que como já foi dito anteriormente, é de mais de 400% ao longo de um ano.

Figura 14 – Símbolos de resistor variável



Fonte: <https://blog.fazedores.com/guia-fazedores-resistores-variaveis/> (2023)

4.3.2.4.3. Sensor de Corrente ACS712-20A

O ACS712 é um dispositivo produzido pela *Allegro MicroSystems INC.* capaz de proporcionar soluções precisas em medições de correntes elétricas tanto em CA quanto em CC, sendo utilizado em aplicações industriais, comerciais e até mesmo em sistemas de comunicação.

Por ser projetado e implementado em uma estrutura compacta, acaba sendo um componente eletrônico de fácil utilização. Suas principais aplicações são voltadas ao controle de motores, detecção e gerenciamento de cargas, a

fontes de alimentação em modo comutado e proteção para faltas de sobrecorrente.

Ele foi escolhido por ser muito popular, já que se trata de um sensor linear de efeito *Hall* – que detecta o campo magnético criado pela passagem de corrente (gerando na saída do módulo uma tensão proporcional de 100mV/A) – que possui os bornes de ligação completamente isolados da saída para o MCU; por ter baixo custo (cerca de R\$ 15,00) e por estar disponível na biblioteca do *Proteus Design Suite*.

O *datasheet* do ACS712-20A encontra-se em anexo.

Foto 5 – Kit para montagem do sensor de corrente ACS712-20A



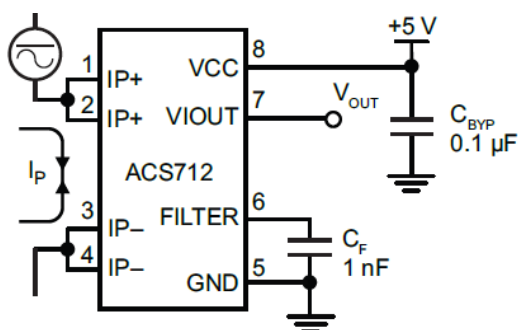
Fonte: <https://www.baudaeletronica.com.br/sensor-de-corrente-ac712-20a-a-20a.html> (2023)

4.3.2.4.4. Capacitor

Capacitores são elementos reativos que reagem à passagem de corrente através do acúmulo de cargas elétricas, ou seja, o capacitor é capaz de armazenar energia eletroestática. O princípio de funcionamento de um capacitor acontece quando uma tensão elétrica é aplicada entre suas placas condutoras, conhecidas como “armaduras”. Um lado da armadura condutora armazena cargas positivas, o outro lado armazena cargas negativas. As cargas são acumuladas de igual modo, balanceado, tanto cargas negativas quanto as positivas possuem o mesmo valor em módulo.

Os capacitores utilizados no projeto são especificados pelo fabricante do sensor de corrente utilizado (ACS712) através do seu *datasheet*, conforme mostrado pela Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de ligação do sensor ACS712



Fonte: Datasheet ACS712 (2020)

4.3.2.4.5. Amperímetro

O amperímetro é um instrumento utilizado para medir a corrente elétrica. O nome do aparelho faz referência ao *ampère*, unidade de medida de corrente elétrica. Para que um amperímetro meça uma corrente, a corrente deve passar por ele e, para isso, as polaridades devem corresponder, ou seja, a polaridade positiva e negativa do aparelho deve coincidir com a polaridade positiva e negativa no circuito. Embora idealmente, os amperímetros devam ter resistência zero, na verdade possuem uma resistência consideravelmente baixa.

No projeto, a razão de utilizar um amperímetro foi apenas para fins de comparação, já que ele informa em tempo real a corrente elétrica que está sendo fornecida para o sistema duto-solo.

Figura 16 – Amperímetro disponível no *Proteus Design Suite*

Fonte: *Proteus Design Suite* (2023)

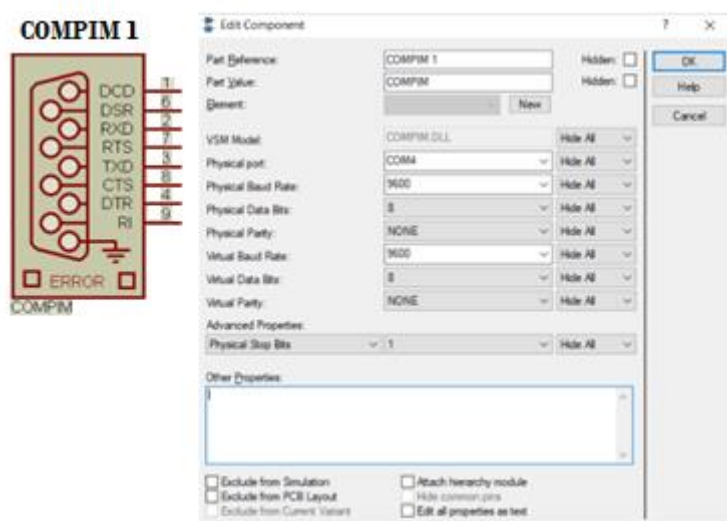
4.3.2.5. COMPIM

O COMPIM do *Proteus Design Suite* modela uma porta serial física. Ele é o responsável por fazer a comunicação serial TX RX da UART do MCU com os demais *softwares*. Ele armazena a comunicação serial recebida e a apresenta como sinais digitais para o circuito. Quaisquer dados seriais transmitidos do modelo UART ou da CPU também viajarão pela porta serial do computador. Outra característica do modelo COMPIM é sua capacidade de fornecer conversão de taxa de transmissão. Também há verificação opcional de *software* e *hardware* que pode ser implementada para tratar dos aspectos físicos e virtuais do dispositivo.

Durante o desenvolvimento do projeto foi utilizado um COMPIM (P1) que utilizava uma porta COM virtual (COM4) para comunicação serial do *Proteus* com o *Nextion Editor* – que utilizava uma outra porta COM virtual (COM3). Depois de finalizado, a tela *Nextion HMI* foi ligada em uma porta COM física (USB) do PC e o COMPIM do *Proteus* teve que ser reconfigurado para o novo endereço da porta COM correspondente, agora COM5.

O projeto também utilizou um segundo COMPIM (P2), tendo em vista que a escolha pelo PIC 18F45K22 foi justamente por ele possuir dois canais UART. Nesse segundo COMPIM foi ligado o módulo Wi-Fi ESP8266 (COM6), que é o responsável pelo envio dos dados do projeto para o aplicativo *web* (*Virtuino*).

Figura 17 – COMPIM do *Proteus Design Suite*



Fonte: *Proteus Design Suite* (2023)

4.3.2.6. Módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01

Este dispositivo é um módulo que oferece uma solução para rede Wi-Fi completa e autônoma, permitindo que o usuário hospede informações no próprio módulo ou as descarregue em outros servidores de aplicativos. Quando o ESP8266 armazena tais dados, os mesmos poderão ser inicializados diretamente de um *flash* externo, já que este módulo possui cache integrado para melhorar o desempenho do sistema e minimizar os requisitos de memória.

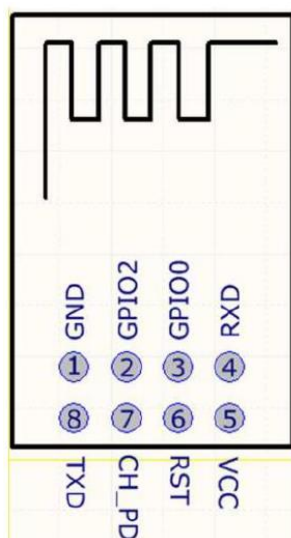
Este módulo conversa com o MCU pela interface serial, possuindo dois pinos GPIO que permitem que o módulo seja programado diretamente via adaptador.

As capacidades de processamento e armazenamento do ESP8266-ESP01 permitem que ele seja integrado a sensores e outros dispositivos específicos de aplicativos por meio das suas GPIOs, necessitando de um mínimo de desenvolvimento inicial e baixo carregamento durante o tempo de execução.

Como já foi dito anteriormente, esse módulo é o módulo de baixo custo (cerca de R\$ 20,00) mais utilizado no mundo e, levando-se em consideração a sua capacidade e a quantidade de informações para sua programação e utilização disponíveis na internet, a escolha por esse dispositivo se deu de forma natural.

O datasheet do módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01 encontra-se em anexo.

Figura 18 – Diagrama de pinos ESP8266-ESP01



Fonte: Datasheet ESP8266-ESP01 (2015)

4.3.2.7. Nextion HMI

Nextion HMI é uma solução de IHM que combina tela sensível ao toque com memória, um processador interno e o *software Nextion Editor* para desenvolvimento de projetos IHM GUI.

O *Nextion HMI* é um display inteligente que oferece uma interface de usuário interativa para dispositivos eletrônicos. Ele é composto por um display de TFT de alta resolução e um microcontrolador integrado que permite a exibição de gráficos, textos e botões. O *Nextion HMI* é facilmente programável e pode ser personalizado para atender às necessidades específicas do usuário.

O display *Nextion HMI* foi escolhido pois ele se conecta ao MCU via TTL Serial (5V, TX, RX, GND) para fornecer notificações de eventos nas quais o MCU pode atuar, podendo facilmente atualizar o progresso e o status de volta ao *display Nextion* utilizando um simples ASCII baseado em texto de instruções. Como já foi dito, o IFMG – Campus Betim também vem trabalhando com o *software* desse dispositivo há alguns anos e, mais recentemente, adquiriu alguns exemplares do *hardware* (disponíveis em seus laboratórios), o que tem difundido e aprofundado cada vez mais o conhecimento acerca dessa excelente ferramenta no Instituto.

Foto 6 – Tela Nextion HMI



Fonte: <https://produto.mercadolivre.com.br/> (2023)

5. DESENVOLVIMENTO

O retificador de corrente impressa é basicamente um dispositivo eletrônico que converte a tensão alternada de entrada em tensão contínua na saída. Além de retificar a tensão de entrada, o retificador também tem a capacidade de disponibilizar diferentes valores de tensão na saída, através dos TAPs de seu transformador. Sabe-se que o TAP é uma opção útil para aplicações em que é necessário ajustar a tensão de saída do transformador sem necessidade de alterar a relação de transformação global. Como a carga abastecida pelo retificador é variável (resistência do solo), o transformador utilizado obrigatoriamente deve possuir TAPs, de forma a fornecer o máximo de tensões possíveis.

O projeto de um retificador de corrente impressa envolve a seleção de componentes adequados e a configuração de um circuito que atenda aos requisitos de saída de corrente e tensão. Antes de iniciar o projeto, é importante definir as especificações de saída do retificador, como a corrente máxima e a tensão de saída desejada.

Após a seleção dos componentes, é importante projetar o circuito de controle. O circuito de controle é responsável por monitorar a tensão e a corrente de saída, além de ajustar a tensão de forma a manter a corrente de carga sempre igual ou um pouco acima do desejável. Não é desejável uma corrente muito acima do especificado para cada retificador, pois a proteção catódica excessiva (conhecida como superproteção catódica) – que são correntes acima de 300% da corrente especificada – leva o duto sofrer uma fragilização por hidrogênio, que pode vir a causar danos de proporções até maiores do que os causados pela corrosão a ser combatida. Dessa forma, o controle não deve se limitar a preocupar-se apenas com a uma corrente mínima, mas também com uma corrente máxima.

Por fim, é importante realizar simulações e testes para verificar o desempenho do retificador. Os testes devem ser realizados com equipamentos de medição adequados para verificar a corrente e tensão de saída, bem como o *ripple* e a eficiência do retificador.

5.1. DESCRIÇÃO DAS PREMISSAS DO PROJETO

Por se tratar de um projeto simulado, todos os componentes que compõem de fato um retificador (fonte de alimentação VAC, disjuntor, DPSs, transformador com TAPs no secundário, ponte retificadora de diodos e filtros) serão representados diretamente por uma fonte de tensão contínua com o valor desejado, ou seja, uma representação direta da tensão disponível na saída do retificador – que é fornecida pelos TAPs (VAC) e retificada pela ponte de diodos em seguida (passando a ser VDC). Essa decisão foi tomada levando-se em consideração, principalmente, a limitação da biblioteca de transformadores do *Proteus*, que não contém um transformador com mais de 4 TAPs no secundário. Foi definido que o PIC 18F45K22 usará suas GPIOs, definidas como saídas digitais, para acionar os relés que estão ligados diretamente a essas fontes, acionando-as de acordo com as necessidades apresentadas.

5.1.1. Definição das tensões disponíveis

Nos retificadores mais instalados na GASMIG, que estão instalados nos grandes centros urbanos e possuem entrada de 220 VAC (Foto 2), há 2 controladores de TAPs no secundário do transformador. Um controlador é conhecido como “ajuste grosso” e tem 6 TAPs possíveis (0, 1, 2, 3, 4 e 5) com variações iguais de 30 V, ou seja, com possibilidade de fornecer 0 V, 30 V, 60 V, 90 V, 120 V, 150 V. O outro controlador é conhecido como “ajuste fino” e também possui 6 TAPs possíveis (0, 1, 2, 3, 4 e 5), só que dessa vez as variações iguais são de apenas 5 V, ou seja, ele tem a possibilidade de fornecer 0 V, 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 25 V. A tensão total disponível na saída do retificador é a soma das tensões fornecidas pelos 2 controladores de TAPs, o que significa que o retificador tem capacidade de fornecer em sua saída a faixa entre 0 e 175 V com variações iguais mínimas de 5 V.

No projeto, levando-se em conta o tamanho da tela *Nextion* e um tamanho adequado para os ícones de seleção das tensões, optou-se por representar um retificador de entrada de 120 VAC (comumente utilizado em áreas rurais onde a tensão máxima fornecida pela CEMIG é 127V), com 12 opções de saída em VDC (5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 30 V, 40 V, 50 V, 60 V, 75 V,

90 V, 105 V, 120 V). Essas são as tensões disponíveis em S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10, S11 e S12, respectivamente (o “S” vem da palavra inglesa “Source”).

A opção pela aplicação de uma tensão VDC específica, de forma direta pelo retificador, se dará pela opção de funcionamento do retificador em “Modo Manual”. Em “Modo Automático” a escolha pela melhor tensão VDC a ser aplicada será feita pelo MCU, através dos dados de resistência do solo que ele recebe do sensor de corrente. Os detalhes do funcionamento do projeto serão apresentados um pouco mais adiante.

5.1.2. Definição das correntes disponíveis

Conforme já apresentado anteriormente, a maioria dos retificadores instalados na GASMIG possuem necessidade de correntes elétricas de até 1 A. No entanto, o cálculo necessário para definição da corrente elétrica de proteção catódica para cada região é complexo e na GASMIG existem retificadores que fornecem correntes elétricas maiores. Como esse projeto trata-se de um trabalho teórico, foram definidas 4 opções de corrente elétrica arbitrariamente (0,5 A, 1,0 A, 1,5 A e 2,0 A).

A opção pela corrente elétrica se dará pela opção de funcionamento do retificador em “Modo Automático”. Como já introduzido no item anterior, no “Modo Manual” é feito apenas a escolha da tensão VDC fixa que será aplicada pelo retificador no sistema, ou seja, não é possível determinar a corrente elétrica CC circulante, já que ela irá variar sempre que houver variação na resistência do solo.

5.1.3. Simulação do sistema duto-solo

O sistema duto-solo consiste na interação entre a tubulação e o solo onde ela está enterrada, e é fundamental para garantir a eficiência da proteção catódica, que é um processo eletroquímico que visa a proteção da tubulação contra a corrosão. Para que esse processo ocorra, é necessário que a corrente elétrica gerada pelo retificador flua do anodo até a tubulação, e retorne ao retificador pelo solo. Essa interação entre a tubulação e o solo é crucial para que a proteção catódica seja efetiva. O solo possui uma resistividade elétrica

que é influenciada por diversos fatores, como a umidade, a temperatura, a composição química, a presença de sais e a compactação. Esses fatores afetam a capacidade do solo em conduzir a corrente elétrica e, conseqüentemente, influenciam a eficiência da proteção catódica. Além disso, a tubulação também pode influenciar a resistência elétrica do solo. Isso ocorre porque a presença da tubulação no solo cria um campo elétrico que afeta suas propriedades elétricas. A resistência elétrica do solo pode ser influenciada tanto pela geometria da tubulação, como pela sua composição química e pelo seu diâmetro. A avaliação cuidadosa desse sistema é fundamental para evitar problemas de corrosão e garantir a segurança e durabilidade da tubulação.

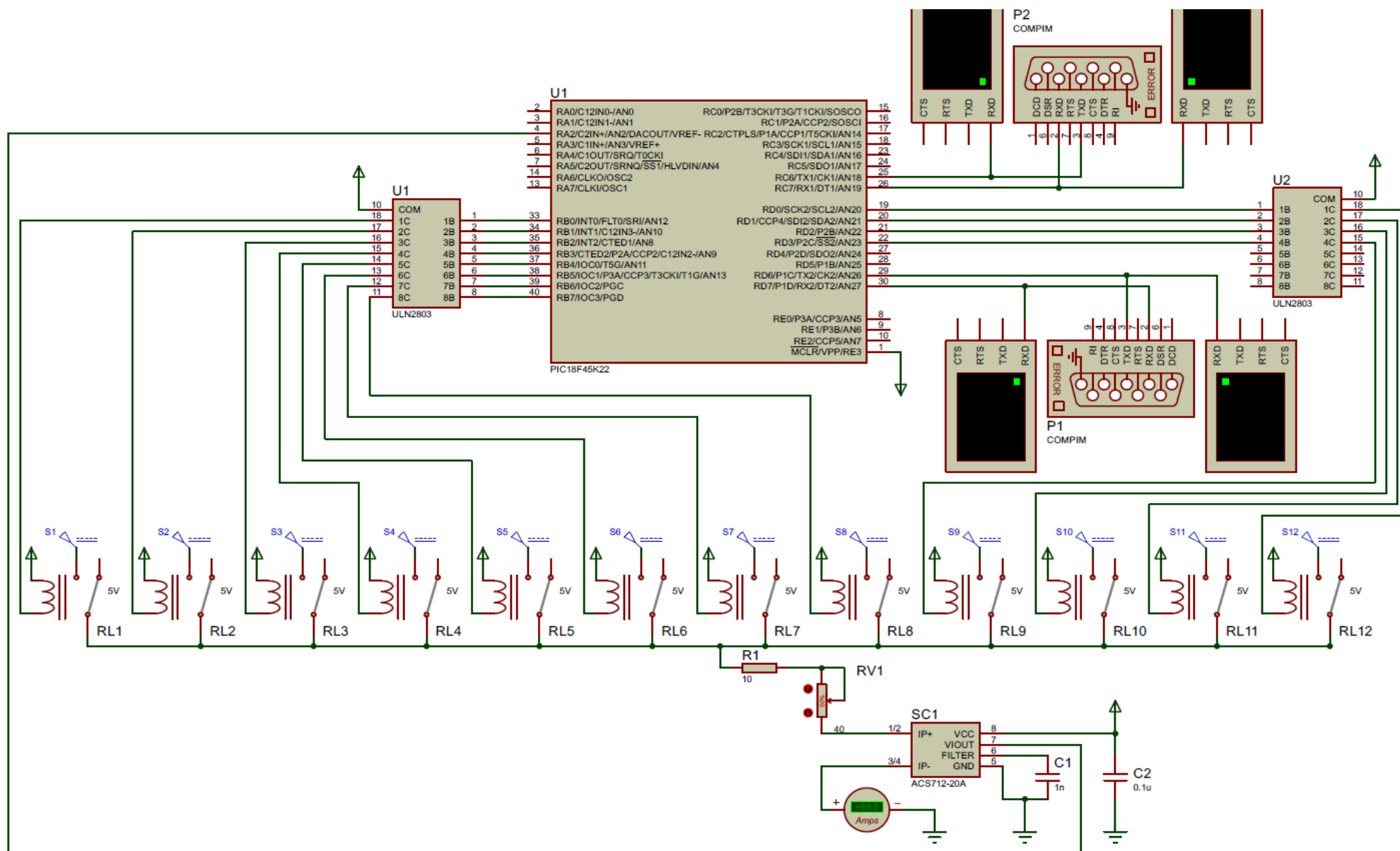
Como já foi informado, a maioria dos sistemas de proteção catódica em operação atualmente na GASMIG apresentam resistência total vista nos terminais de saída do retificador valores de no máximo 40 Ω . Dessa forma, o sistema duto-solo será representado no projeto por uma resistência fixa de 10 Ω em série com uma resistência variável de no máximo 40 Ω , o que significa que a resistência total do circuito varia entre 10 e 50 Ω , ou seja, com um valor máximo próximo ao valor real e uma variação entre o valor máximo e o valor mínimo de 400% – variação comprovada por Resende (2018). O sistema é completado por um sensor de corrente (ACS712) que é o responsável por enviar ao MCU os dados atualizados da corrente CC fornecida pelo retificador.

5.1.4. Montagem do projeto no *Proteus Design Suite*

A Figura 19 mostra a montagem do projeto no *Proteus Design Suite*. Como é possível observar na figura, estão listados no lado esquerdo (“*DEVICES*”) os 8 dispositivos diferentes utilizados:

- Sensor de Corrente ACS712;
- Capacitor;
- COMPIM;
- MCU PIC18F45K22;
- Potenciômetro;
- Relé;
- Resistor; e
- CI ULN2803.

Figura 19 – Montagem do projeto no *Proteus Design Suite*



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

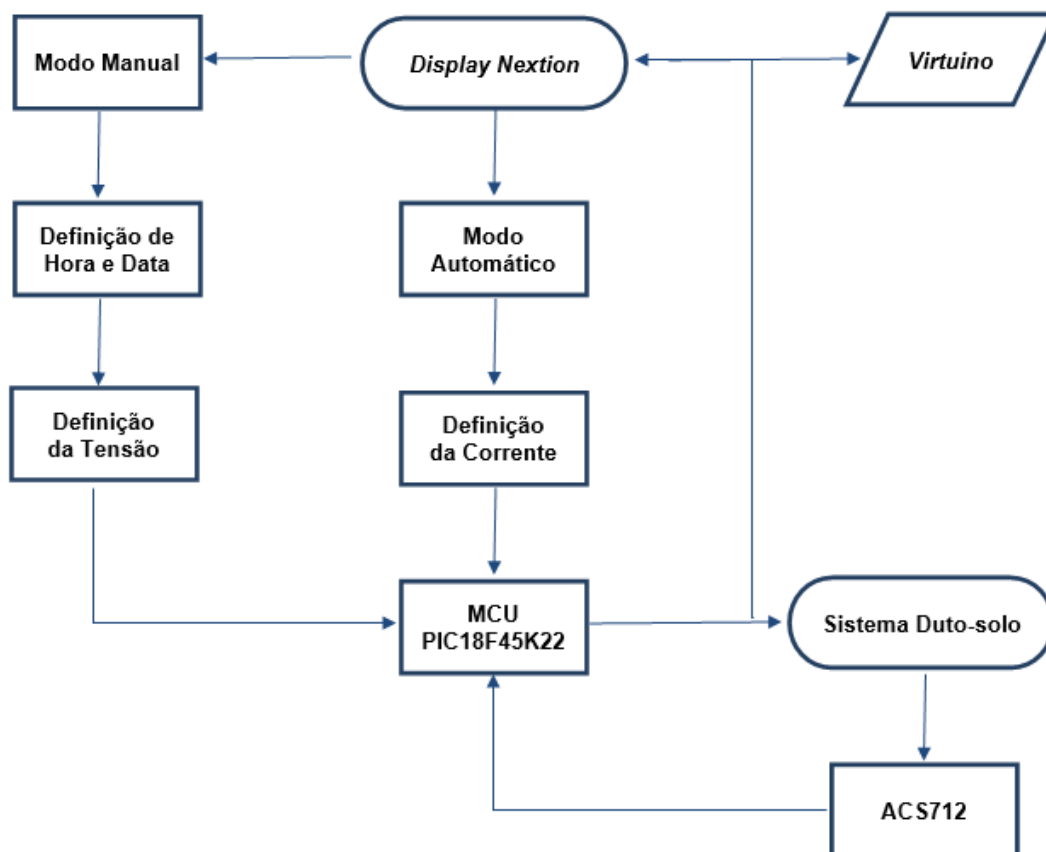
Como é possível observar na Figura 19, foram utilizados 12 relés, ou seja, 1 relé dedicado para cada fonte de tensão VDC disponível. O acionamento desses relés se dará por 12 GPIOs do MCU. As portas GPIO podem ser configuradas como entradas ou saídas digitais, dependendo da necessidade do projeto. Nesse caso todas as 8 portas do PORTB (RB0, RB1, RB2, RB3, RB4, RB5, RB6 e RB7) e mais 4 portas do PORTD (RD0, RD1, RD2 e RD3) foram configuradas com saídas, o que as tornam capazes de controlar outros dispositivos, nesse caso os relés.

Os relés operam cargas de potências elevadas e, por isso, eles não são ligados diretamente nos GPIOs do MCU. Para fazer essa ponte utilizamos o CI ULN2803. O acionamento dos relés é o responsável por aplicar a tensão VDC na carga (sistema duto-solo) e, a partir daí, uma corrente elétrica CC – resultado da relação entre tensão (V) e resistência (Ω) – passará a circular pelo circuito. Essa corrente elétrica é percebida pelo sensor de corrente que fornece uma tensão de saída (em seu GPIO 7 – VOUT) proporcional à corrente medida, com uma sensibilidade de 100 mV/A para o modelo ACS712-20. Isso significa que, para cada 1 A de corrente que passa pelo resistor de medição, a tensão de saída do sensor aumenta em 100 mV. Essa tensão fornecida pelo ACS712 varia entre 2,5 V (correspondente a 0 A) e 5 V (correspondente a 20 A), com resolução de 10 bits (variando entre 0 e 1023) e, no projeto, está sendo aplicada na porta AN2 (GPIO configurada como entrada) do MCU.

No PIC 18F45K22 a UART1 fica no PORTC (TX1 na GPIO RC6 e RX1 na GPIO RC7) e a UART2 fica no PORTD (TX2 na GPIO RD6 e RX2 na GPIO RD7). Assim sendo, as GPIOs RC6 e RD6 (TX1 e TX2 respectivamente) foram configuradas como portas de saídas e as GPIOs RC7 e RD7 (RX1 e RX2 respectivamente) foram configuradas como portas de entradas. A UART1 foi configurada para enviar os dados para o aplicativo *web* (*Virtuino*) via Wi-Fi (através do COMPIM P2) e a UART2 foi configurada para troca de informações com o *Nextion* (através do COMPIM P1). A velocidade da comunicação é determinada pela taxa de *Baud*, que é a quantidade de bits por segundo que são transmitidos. A taxa de *Baud* utilizada no projeto foi de 9600 bps.

5.1.5. Fluxograma do projeto

Figura 20 – Fluxograma do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O Fluxograma apresentado representa o funcionamento desejado do projeto.

Através do *display Nexion* o usuário deve definir se ele quer que o retificador opere de forma “Manual” ou de forma “Automática”. Apesar do foco do projeto ser de um retificador automático, o modo “Manual” foi disponibilizado para que o usuário possa entender como é o funcionamento de um retificador instalado no SDGN da GASMIG e, a partir de então, visualizar de forma prática a grande vantagem do sistema operando em modo “Automático”.

Caso o usuário opte pelo funcionamento manual, ele será o responsável por alimentar o retificador com os dados de hora e data. Em seguida, ele definirá a tensão que o retificador fornecerá ao sistema duto-solo. Nesse modo, não importa o que aconteça com a resistência do solo, a tensão aplicada será sempre a mesma até que o usuário volte a alterá-la, como ocorre atualmente.

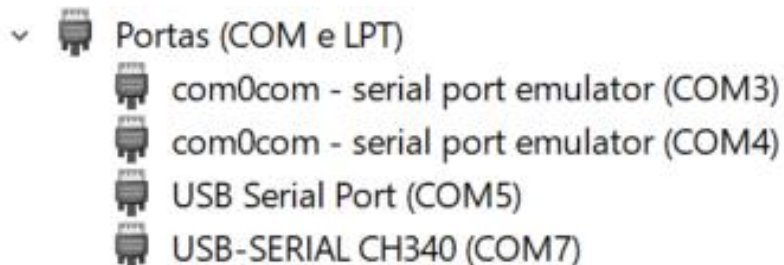
Assim sendo, o usuário só possui o controle da corrente elétrica que o retificador irá fornecer ao sistema duto-solo no momento em que coloca o retificador para funcionar. A partir daí qualquer alteração nas características do solo não serão tratadas, uma vez que nesse caso o sistema opera em malha aberta e, portanto, não tem a capacidade de tomar qualquer decisão de alteração de parâmetros.

Já para o caso em que se deseja o funcionamento automático, o único passo a ser executado pelo usuário é o de definição da corrente elétrica que ele deseja que o retificador forneça ao sistema duto-solo. A corrente necessária para proteção de cada trecho de gasodutos é calculada com base em vários parâmetros e esse trabalho é realizado por uma equipe dedicada na GASMIG. Uma vez definida a corrente de proteção catódica, agora o retificador será capaz de ajustar a tensão de saída de acordo com as variações da resistência do solo, garantindo sempre que a corrente fornecida ao sistema duto-solo seja capaz de garantir a proteção do duto, ou seja, o valor deve ser maior do que o valor mínimo especificado e menor que 100% desse valor, de forma a manter a corrente elétrica sempre longe da faixa capaz de levar o duto a uma fragilização por hidrogênio – tendo em vista que esse fenômeno ocorre quando há uma combinação entre presença de hidrogênio difuso no material, tensões mecânicas e uma fonte de hidrogênio (como a eletrólise da água durante a proteção catódica) – em outras palavras, as condições em um duto enterrado são bastante favoráveis a esse tipo de problema e, portanto, deve-se ficar muito atento no controle da corrente elétrica fornecida. Todas as telas desenvolvidas para esse projeto estão apresentadas com suas devidas explicações no APÊNDICE B.

Como é possível observar no Fluxograma, o responsável pela operação do retificador é o MCU (PIC 18F45K22) e ele toma as decisões com base no retorno que ele recebe do sensor de corrente (ACS712). Além disso, ao mesmo tempo que o MCU opera o sistema, ele também envia os dados de resistência do solo e corrente e tensão aplicada pelo retificador em tempo real tanto para o *Nextion* quanto para o aplicativo *web* (*Virtuino*). A comunicação com o *Nextion* é feita via porta COM física (USB) do PC (COM5), que faz o par serial com a porta COM virtual criada no PC (COM3) pelo *software* COM0COM. Já a comunicação com o *Virtuino* é realizada através de uma rede Wi-Fi criada pelo

módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01 (rede “TCC THIAGO DJOSEFF”) que está conectado em uma porta COM física (USB) do PC (COM7).

Figura 21 – *Display Nextion* conectado na porta serial USB COM5 e módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01 conectado na porta serial USB COM7



Fonte: PC do autor (2023)

A rede Wi-Fi é criada como ponto de acesso através de comandos AT executados pelo próprio MCU. Também são criados via comandos AT um IP do ponto de acesso (192.168.1.254) e aberta uma porta de comunicação (100) para que o MCU possa usar esse canal para envio dos dados do projeto.

O código fonte está no Apêndice A.

Figura 22 – Rede Wi-Fi criada pelo módulo ESP8266-ESP01 para envio de dados



Fonte: *Smartphone* do autor (2023)

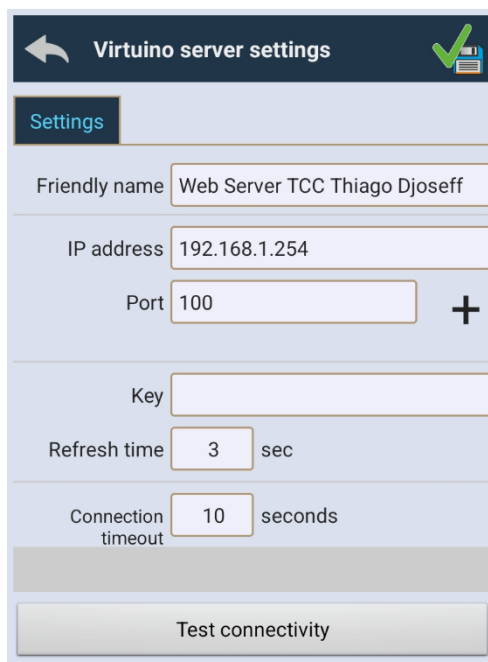
5.1.6. Tela do aplicativo *web* (*Virtuino*)

Figura 23 – Tela do aplicativo *web* (*Virtuino*) projetado para receber os dados do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para que o aplicativo *web* fosse capaz de receber os dados enviados pelo MCU, foi necessário criar um servidor *web* dentro do *Virtuino* específico para o projeto. O servidor recebeu o nome de “Web Server TCC Thiago Djoseff”. Nele foi definido o mesmo endereço de IP (192.168.1.254) e porta (100) criados pelo MCU, através de comandos AT, para funcionamento do módulo Wi-Fi ESP8266-ESP01 e, assim, garantindo o recebimento dos dados do projeto pelo *Virtuino*.

Figura 24 – Configurações do servidor web do *Virtuino*

Virtuino server settings

Settings

Friendly name Web Server TCC Thiago DJoseff

IP address 192.168.1.254

Port 100 +

Key

Refresh time 3 sec

Connection timeout 10 seconds

Test connectivity

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como é possível observar na Figura 24, foi definido um tempo de atualização (*Refresh time*) de 3 segundos. Isso quer dizer que o aplicativo atualiza os dados informados em sua tela principal a cada 3 segundos, o que não quer dizer que o tempo entre uma atualização ocorrida “em campo” (simulada no *Proteus* e imediatamente mostrada no *Nextion*) leve 3 segundos para ser mostrada no *Virtuino*, pois ainda tem o tempo normal de atraso causado pelo envio de informações via Wi-Fi. Também é possível observar que o tempo limite de conexão (*Connection timeout*) é 10 segundos, ou seja, caso o aplicativo fique mais do que esse tempo sem obter resposta do módulo Wi-Fi a conexão será perdida.

Vale ressaltar que esses dois parâmetros são ajustáveis e devem ser determinados de acordo com o processo a que está atrelado. Como a alteração da resistência do solo se faz de forma gradual, o processo de ajuste de corrente de proteção catódica não precisa ser instantâneo e, assim sendo, esses valores foram definidos pelo autor de forma a atender ao propósito do projeto e não causar qualquer tipo de sobrecarga e/ou aquecimento excessivo de qualquer componente.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Concluído o desenvolvimento, o projeto final foi montado e colocado em operação, conforme mostrado pela Foto 7.

Inicialmente foi testado o “Modo Manual”. Foram selecionadas cada uma das 12 opções de tensão VDC disponibilizadas e, em cada uma delas, foi simulada a alteração da resistência do solo através da variação de 0 a 100% da resistência variável de 40 Ω , o que fez com que a resistência total do circuito variasse de 10 a 50 Ω . A Tabela 7 apresenta a corrente elétrica informada na tela de cada software utilizado no projeto (*Proteus*, *Nextion* e *Virtuino*) nos pontos determinados de 0% (resistência do solo igual a 10 Ω), 25% (resistência do solo igual a 20 Ω), 50% (resistência do solo igual a 30 Ω), 75% (resistência do solo igual a 40 Ω) e 100% (resistência do solo igual a 50 Ω). Por se tratar de um projeto simulado de um sistema que não exige uma precisão alta, tanto o *display Nextion* quanto o aplicativo *web (Virtuino)* foram configurados para exibir os valores com apenas uma casa decimal, enquanto o *Proteus* exibe sempre os valores com 3 dígitos, ou seja, enquanto a corrente elétrica for menor do que 10 A ele exibirá os valores com duas casas decimais.

Finalizados os testes iniciais, deu-se início aos testes do “Modo Automático”. Foram selecionadas cada uma das 4 opções de corrente elétrica CC disponibilizadas (0,5 A, 1,0 A, 1,5 A e 2,0 A) e, em cada uma delas, também foi simulada a alteração da resistência do solo através da variação de 0 a 100% do potenciômetro de 40 Ω . A Tabela 8 apresenta a corrente elétrica informada na tela de cada um dos *softwares* utilizado no projeto (*Proteus*, *Nextion* e *Virtuino*) além da tensão VDC fornecida pelo retificador em todos os 101 pontos (0 a 100).

Os dados da Tabela 8 também foram utilizados para os 5 gráficos apresentados em seguida. Os gráficos mostram de forma mais clara e eficaz o funcionamento do retificador em cada uma das opções de corrente elétrica disponibilizadas e, ainda, as diferenças dos valores das correntes elétricas exibidas na tela de cada *software*.

Foto 7 - Projeto final em operação



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 8 – Análise do funcionamento do projeto em "Modo Manual"

TENSÃO FIXA (V)	CORRENTE ELÉTRICA FORNECIDA NA TELA DE CADA SOFTWARE (A)														
	RESISTÊNCIA VARIÁVEL														
	0%			25%			50%			75%			100%		
	Proteus	Nextion	Virtuino	Proteus	Nextion	Virtuino	Proteus	Nextion	Virtuino	Proteus	Nextion	Virtuino	Proteus	Nextion	Virtuino
5	0,49	0,5	0,5	0,25	0,2	0,3	0,17	0,1	0,2	0,12	0,1	0,1	0,10	0,1	0,1
10	0,98	0,9	1,0	0,50	0,5	0,5	0,33	0,3	0,3	0,25	0,2	0,3	0,20	0,2	0,2
15	1,47	1,4	1,5	0,75	0,7	0,8	0,50	0,5	0,5	0,37	0,3	0,4	0,30	0,3	0,3
20	1,96	2,0	2,0	0,99	1,0	1,0	0,66	0,6	0,7	0,50	0,5	0,5	0,40	0,4	0,4
30	2,94	2,9	2,9	1,49	1,5	1,5	1,00	1,0	1,0	0,75	0,7	0,8	0,60	0,6	0,6
40	3,92	4,0	4,0	1,99	2,0	2,0	1,33	1,3	1,4	1,00	1,0	1,0	0,80	0,7	0,8
50	4,90	4,8	4,9	2,49	2,5	2,5	1,66	1,6	1,7	1,25	1,2	1,3	1,00	1,0	1,0
60	5,88	5,9	6,0	2,98	3,0	3,1	1,99	2,0	2,0	1,50	1,5	1,5	1,20	1,2	1,2
75	7,35	7,3	7,3	3,73	3,8	3,8	2,49	2,5	2,5	1,87	1,9	1,9	1,50	1,5	1,5
90	8,82	9,0	9,0	4,48	4,6	4,6	2,99	3,0	3,1	2,24	2,2	2,3	1,80	1,7	1,8
105	10,3	10,3	10,3	5,22	5,3	5,3	3,49	3,5	3,6	2,62	2,6	2,7	2,10	2,1	2,2
120	11,8	11,9	11,9	5,97	6,1	6,1	3,99	4,0	4,1	2,99	3,0	3,1	2,40	2,4	2,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 9 – Análise do funcionamento do projeto em “Modo Automático”

RESISTÊNCIA VARIÁVEL (%)	CORRENTE ELÉTRICA FORNECIDA NA TELA DE CADA SOFTWARE (A)															
	CORRENTE DE PROTEÇÃO CATÓDICA DEFINIDA															
	0,5 A				1,0 A				1,5 A				2,0 A			
	Proteus	Nextion	Virtuino	TENSÃO VDC (V)	Proteus	Nextion	Virtuino	TENSÃO VDC (V)	Proteus	Nextion	Virtuino	TENSÃO VDC (V)	Proteus	Nextion	Virtuino	TENSÃO VDC (V)
0	0,98	1,0	1,0	10	1,47	1,5	1,5	15	1,96	1,9	2,0	20	2,94	2,9	3,0	30
1	0,95	0,9	1,0	10	1,43	1,4	1,5	15	1,90	1,9	1,9	20	2,86	2,9	2,9	30
2	0,92	0,9	0,9	10	1,38	1,4	1,4	15	1,83	1,8	1,9	20	2,75	2,8	2,8	30
3	0,88	0,9	0,9	10	1,33	1,3	1,4	15	1,77	1,8	1,8	20	2,65	2,7	2,7	30
4	0,85	0,8	0,9	10	1,28	1,3	1,3	15	1,71	1,7	1,7	20	2,56	2,6	2,6	30
5	0,83	0,8	0,8	10	1,24	1,2	1,3	15	1,65	1,6	1,7	20	2,48	2,5	2,5	30

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS – IFMG CAMPUS BETIM

6	0,80	0,8	0,8	10	1,20	1,2	1,2	15	1,60	1,6	1,6	20	2,40	2,5	2,5	30
7	0,78	0,8	0,8	10	1,16	1,1	1,2	15	2,33	2,3	2,4	30	2,33	2,3	2,4	30
8	0,75	0,7	0,8	10	1,13	1,1	1,1	15	2,26	2,3	2,3	30	2,26	2,3	2,3	30
9	0,73	0,7	0,7	10	1,09	1,1	1,1	15	2,19	2,2	2,2	30	2,19	2,2	2,2	30
10	0,71	0,7	0,7	10	1,42	1,4	1,5	20	2,13	2,1	2,2	30	2,13	2,1	2,2	30
11	0,69	0,7	0,7	10	1,38	1,4	1,4	20	2,07	2,1	2,1	30	2,07	2,1	2,1	30
12	0,67	0,6	0,7	10	1,34	1,3	1,4	20	2,01	2,0	2,1	30	2,68	2,7	2,7	40
13	0,65	0,6	0,7	10	1,31	1,3	1,3	20	1,96	2,0	2,0	30	2,61	2,6	2,7	40
14	0,64	0,6	0,7	10	1,27	1,3	1,3	20	1,91	2,0	2,0	30	2,55	2,6	2,6	40
15	0,62	0,6	0,6	10	1,24	1,2	1,3	20	1,86	1,9	1,9	30	2,48	2,5	2,5	40
16	0,61	0,6	0,6	10	1,21	1,2	1,2	20	1,82	1,8	1,9	30	2,42	2,4	2,5	40
17	0,59	0,6	0,6	10	1,18	1,2	1,2	20	1,78	1,8	1,8	30	2,37	2,4	2,4	40
18	0,87	0,8	0,9	15	1,16	1,1	1,2	20	1,73	1,7	1,8	30	2,31	2,3	2,4	40
19	0,85	0,8	0,9	15	1,13	1,1	1,2	20	1,69	1,7	1,7	30	2,26	2,3	2,3	40
20	0,83	0,8	0,8	15	1,10	1,1	1,1	20	1,66	1,6	1,7	30	2,21	2,2	2,3	40
21	0,81	0,8	0,8	15	1,08	1,1	1,1	20	1,62	1,6	1,7	30	2,16	2,2	2,2	40
22	0,79	0,8	0,8	15	1,59	1,6	1,6	30	1,59	1,6	1,6	30	2,12	2,1	2,2	40
23	0,78	0,7	0,8	15	1,55	1,5	1,6	30	2,07	2,1	2,1	40	2,07	2,1	2,1	40
24	0,76	0,7	0,8	15	1,52	1,5	1,6	30	2,03	2,0	2,1	40	2,54	2,5	2,6	50
25	0,75	0,7	0,8	15	1,49	1,5	1,5	30	1,99	2,0	2,0	40	2,49	2,5	2,5	50
26	0,73	0,7	0,7	15	1,46	1,4	1,5	30	1,95	1,9	2,0	40	2,44	2,4	2,5	50
27	0,72	0,7	0,7	15	1,44	1,4	1,5	30	1,91	1,9	2,0	40	2,39	2,4	2,4	50
28	0,70	0,7	0,7	15	1,41	1,4	1,4	30	1,88	1,9	1,9	40	2,35	2,4	2,4	50
29	0,69	0,7	0,7	15	1,38	1,4	1,4	30	1,84	1,8	1,9	40	2,30	2,3	2,4	50
30	0,68	0,6	0,7	15	1,36	1,3	1,4	30	1,81	1,8	1,9	40	2,26	2,3	2,3	50
31	0,67	0,6	0,7	15	1,33	1,3	1,4	30	1,78	1,8	1,8	40	2,22	2,2	2,3	50
32	0,65	0,6	0,7	15	1,31	1,3	1,3	30	1,75	1,7	1,8	40	2,18	2,2	2,2	50
33	0,64	0,6	0,7	15	1,29	1,3	1,3	30	1,72	1,7	1,8	40	2,15	2,1	2,2	50
34	0,63	0,6	0,6	15	1,27	1,2	1,3	30	1,69	1,7	1,7	40	2,11	2,1	2,2	50
35	0,62	0,6	0,6	15	1,24	1,2	1,3	30	1,66	1,7	1,7	40	2,07	2,1	2,1	50
36	0,61	0,6	0,6	15	1,22	1,2	1,3	30	1,63	1,6	1,7	40	2,45	2,5	2,5	60
37	0,60	0,6	0,6	15	1,20	1,2	1,2	30	1,61	1,6	1,6	40	2,41	2,4	2,5	60

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS – IFMG CAMPUS BETIM

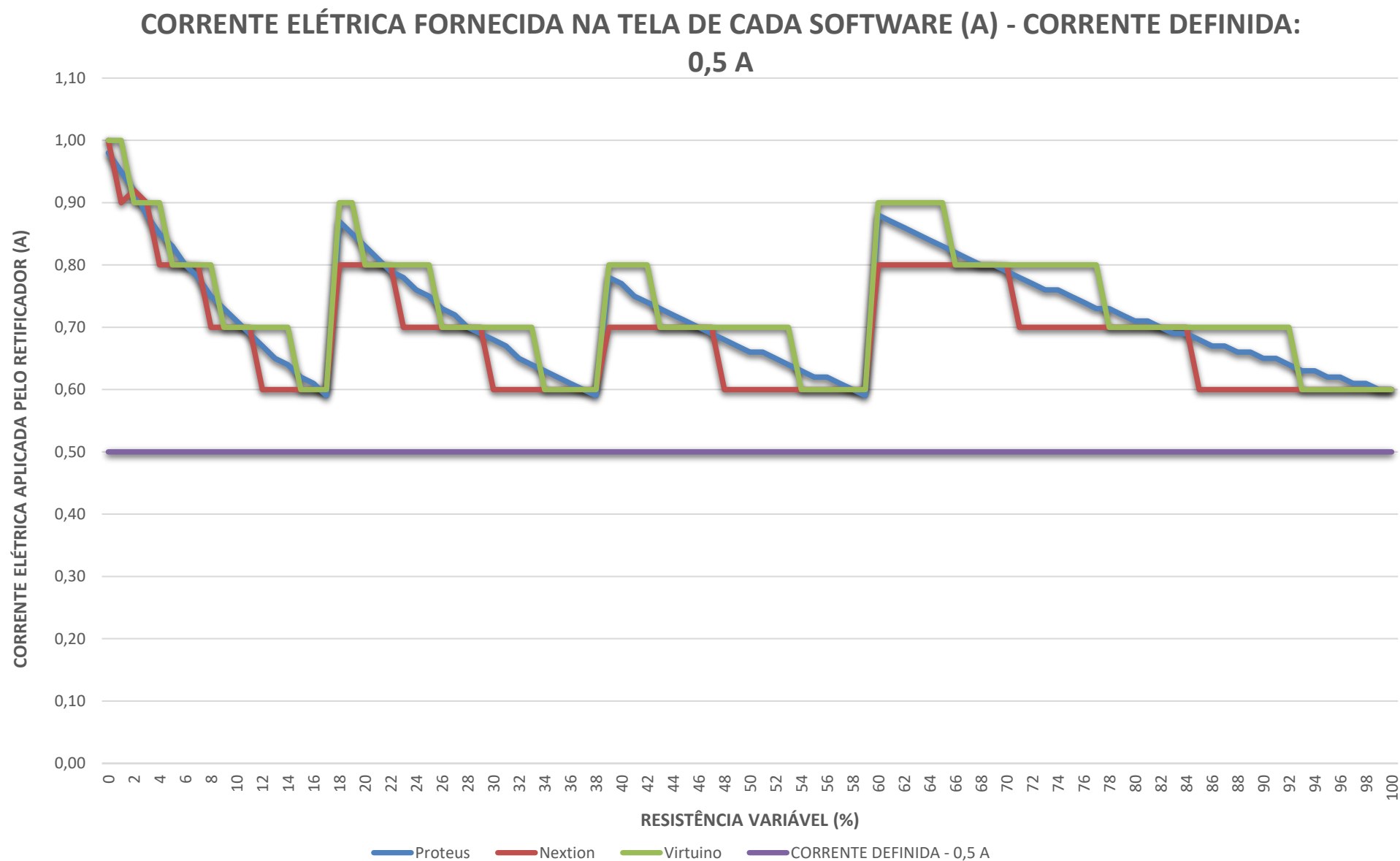
38	0,59	0,6	0,6	15	1,19	1,2	1,2	30	1,58	1,6	1,6	40	2,37	2,4	2,4	60
39	0,78	0,7	0,8	20	1,17	1,1	1,2	30	1,95	1,9	2,0	50	2,33	2,3	2,4	60
40	0,77	0,7	0,8	20	1,15	1,1	1,2	30	1,92	1,9	2,0	50	2,30	2,3	2,4	60
41	0,75	0,7	0,8	20	1,13	1,1	1,2	30	1,89	1,9	1,9	50	2,26	2,3	2,3	60
42	0,74	0,7	0,8	20	1,12	1,1	1,1	30	1,86	1,9	1,9	50	2,23	2,2	2,3	60
43	0,73	0,7	0,7	20	1,10	1,1	1,1	30	1,83	1,8	1,9	50	2,20	2,2	2,2	60
44	0,72	0,7	0,7	20	1,08	1,1	1,1	30	1,80	1,8	1,8	50	2,17	2,2	2,2	60
45	0,71	0,7	0,7	20	1,42	1,4	1,4	40	1,78	1,8	1,8	50	2,14	2,1	2,2	60
46	0,70	0,7	0,7	20	1,40	1,4	1,4	40	1,75	1,7	1,8	50	2,11	2,1	2,2	60
47	0,69	0,7	0,7	20	1,38	1,4	1,4	40	1,73	1,7	1,8	50	2,08	2,1	2,1	60
48	0,68	0,6	0,7	20	1,37	1,3	1,4	40	1,71	1,7	1,7	50	2,56	2,6	2,6	75
49	0,67	0,6	0,7	20	1,35	1,3	1,4	40	1,68	1,7	1,7	50	2,53	2,5	2,6	75
50	0,66	0,6	0,7	20	1,33	1,3	1,4	40	1,66	1,6	1,7	50	2,49	2,5	2,5	75
51	0,66	0,6	0,7	20	1,31	1,3	1,3	40	1,64	1,6	1,7	50	2,46	2,5	2,5	75
52	0,65	0,6	0,7	20	1,29	1,3	1,3	40	1,62	1,6	1,7	50	2,43	2,4	2,5	75
53	0,64	0,6	0,7	20	1,28	1,3	1,3	40	1,60	1,6	1,6	50	2,40	2,4	2,5	75
54	0,63	0,6	0,6	20	1,26	1,2	1,3	40	1,58	1,6	1,6	50	2,37	2,4	2,4	75
55	0,62	0,6	0,6	20	1,25	1,2	1,3	40	1,87	1,9	1,9	60	2,34	2,3	2,4	75
56	0,62	0,6	0,6	20	1,23	1,2	1,3	40	1,85	1,8	1,9	60	2,31	2,3	2,4	75
57	0,61	0,6	0,6	20	1,22	1,2	1,2	40	1,82	1,8	1,9	60	2,28	2,3	2,3	75
58	0,60	0,6	0,6	20	1,20	1,2	1,2	40	1,80	1,8	1,8	60	2,25	2,3	2,3	75
59	0,59	0,6	0,6	20	1,19	1,2	1,2	40	1,78	1,8	1,8	60	2,23	2,2	2,3	75
60	0,88	0,8	0,9	30	1,17	1,1	1,2	40	1,76	1,7	1,8	60	2,20	2,2	2,2	75
61	0,87	0,8	0,9	30	1,16	1,1	1,2	40	1,74	1,7	1,8	60	2,17	2,2	2,2	75
62	0,86	0,8	0,9	30	1,15	1,1	1,2	40	1,72	1,7	1,8	60	2,15	2,1	2,2	75
63	0,85	0,8	0,9	30	1,13	1,1	1,2	40	1,70	1,7	1,7	60	2,12	2,1	2,2	75
64	0,84	0,8	0,9	30	1,12	1,1	1,1	40	1,68	1,7	1,7	60	2,10	2,1	2,1	75
65	0,83	0,8	0,9	30	1,11	1,1	1,1	40	1,66	1,7	1,7	60	2,08	2,1	2,1	75
66	0,82	0,8	0,8	30	1,10	1,1	1,1	40	1,64	1,6	1,7	60	2,05	2,1	2,1	75
67	0,81	0,8	0,8	30	1,08	1,1	1,1	40	1,63	1,6	1,7	60	2,44	2,4	2,5	90
68	0,80	0,8	0,8	30	1,34	1,3	1,4	50	1,61	1,6	1,6	60	2,41	2,4	2,5	90
69	0,80	0,8	0,8	30	1,33	1,3	1,3	50	1,59	1,6	1,6	60	2,39	2,4	2,4	90

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS – IFMG CAMPUS BETIM

70	0,79	0,8	0,8	30	1,31	1,3	1,3	50	1,57	1,6	1,6	60	2,36	2,4	2,4	90
71	0,78	0,7	0,8	30	1,30	1,3	1,3	50	1,95	1,9	2,0	75	2,34	2,4	2,4	90
72	0,77	0,7	0,8	30	1,29	1,3	1,3	50	1,93	1,9	2,0	75	2,31	2,3	2,4	90
73	0,76	0,7	0,8	30	1,27	1,3	1,3	50	1,91	1,9	2,0	75	2,29	2,3	2,3	90
74	0,76	0,7	0,8	30	1,26	1,2	1,3	50	1,89	1,9	1,9	75	2,27	2,3	2,3	90
75	0,75	0,7	0,8	30	1,25	1,2	1,3	50	1,87	1,9	1,9	75	2,24	2,2	2,3	90
76	0,74	0,7	0,8	30	1,23	1,2	1,3	50	1,85	1,8	1,9	75	2,22	2,2	2,3	90
77	0,73	0,7	0,8	30	1,22	1,2	1,2	50	1,83	1,8	1,9	75	2,20	2,2	2,3	90
78	0,73	0,7	0,7	30	1,21	1,2	1,2	50	1,82	1,8	1,9	75	2,18	2,2	2,2	90
79	0,72	0,7	0,7	30	1,20	1,2	1,2	50	1,80	1,8	1,8	75	2,16	2,2	2,2	90
80	0,71	0,7	0,7	30	1,19	1,2	1,2	50	1,78	1,8	1,8	75	2,14	2,1	2,2	90
81	0,71	0,7	0,7	30	1,18	1,1	1,2	50	1,76	1,8	1,8	75	2,12	2,1	2,2	90
82	0,70	0,7	0,7	30	1,17	1,1	1,2	50	1,75	1,7	1,8	75	2,10	2,1	2,1	90
83	0,69	0,7	0,7	30	1,15	1,1	1,2	50	1,73	1,7	1,8	75	2,08	2,1	2,1	90
84	0,69	0,7	0,7	30	1,14	1,1	1,2	50	1,72	1,7	1,8	75	2,06	2,1	2,1	90
85	0,68	0,6	0,7	30	1,13	1,1	1,2	50	1,70	1,7	1,7	75	2,38	2,4	2,4	105
86	0,67	0,6	0,7	30	1,12	1,1	1,1	50	1,69	1,7	1,7	75	2,36	2,4	2,4	105
87	0,67	0,6	0,7	30	1,11	1,1	1,1	50	1,67	1,7	1,7	75	2,34	2,3	2,4	105
88	0,66	0,6	0,7	30	1,10	1,1	1,1	50	1,66	1,6	1,7	75	2,32	2,3	2,4	105
89	0,66	0,6	0,7	30	1,09	1,1	1,1	50	1,64	1,6	1,7	75	2,30	2,3	2,4	105
90	0,65	0,6	0,7	30	1,08	1,1	1,1	50	1,63	1,6	1,7	75	2,28	2,3	2,3	105
91	0,65	0,6	0,7	30	1,29	1,2	1,3	60	1,61	1,6	1,6	75	2,26	2,3	2,3	105
92	0,64	0,6	0,7	30	1,28	1,2	1,3	60	1,60	1,6	1,6	75	2,24	2,2	2,3	105
93	0,63	0,6	0,6	30	1,27	1,2	1,3	60	1,59	1,6	1,6	75	2,22	2,2	2,3	105
94	0,63	0,6	0,6	30	1,26	1,2	1,3	60	1,57	1,6	1,6	75	2,20	2,2	2,3	105
95	0,62	0,6	0,6	30	1,25	1,2	1,3	60	1,87	1,9	1,9	90	2,18	2,2	2,2	105
96	0,62	0,6	0,6	30	1,24	1,2	1,3	60	1,86	1,8	1,9	90	2,16	2,2	2,2	105
97	0,61	0,6	0,6	30	1,23	1,2	1,2	60	1,84	1,8	1,9	90	2,15	2,1	2,2	105
98	0,61	0,6	0,6	30	1,22	1,2	1,2	60	1,83	1,8	1,9	90	2,13	2,1	2,2	105
99	0,60	0,6	0,6	30	1,21	1,2	1,2	60	1,81	1,8	1,9	90	2,11	2,1	2,2	105
100	0,60	0,6	0,6	30	1,20	1,2	1,2	60	1,80	1,8	1,8	90	2,10	2,1	2,1	105

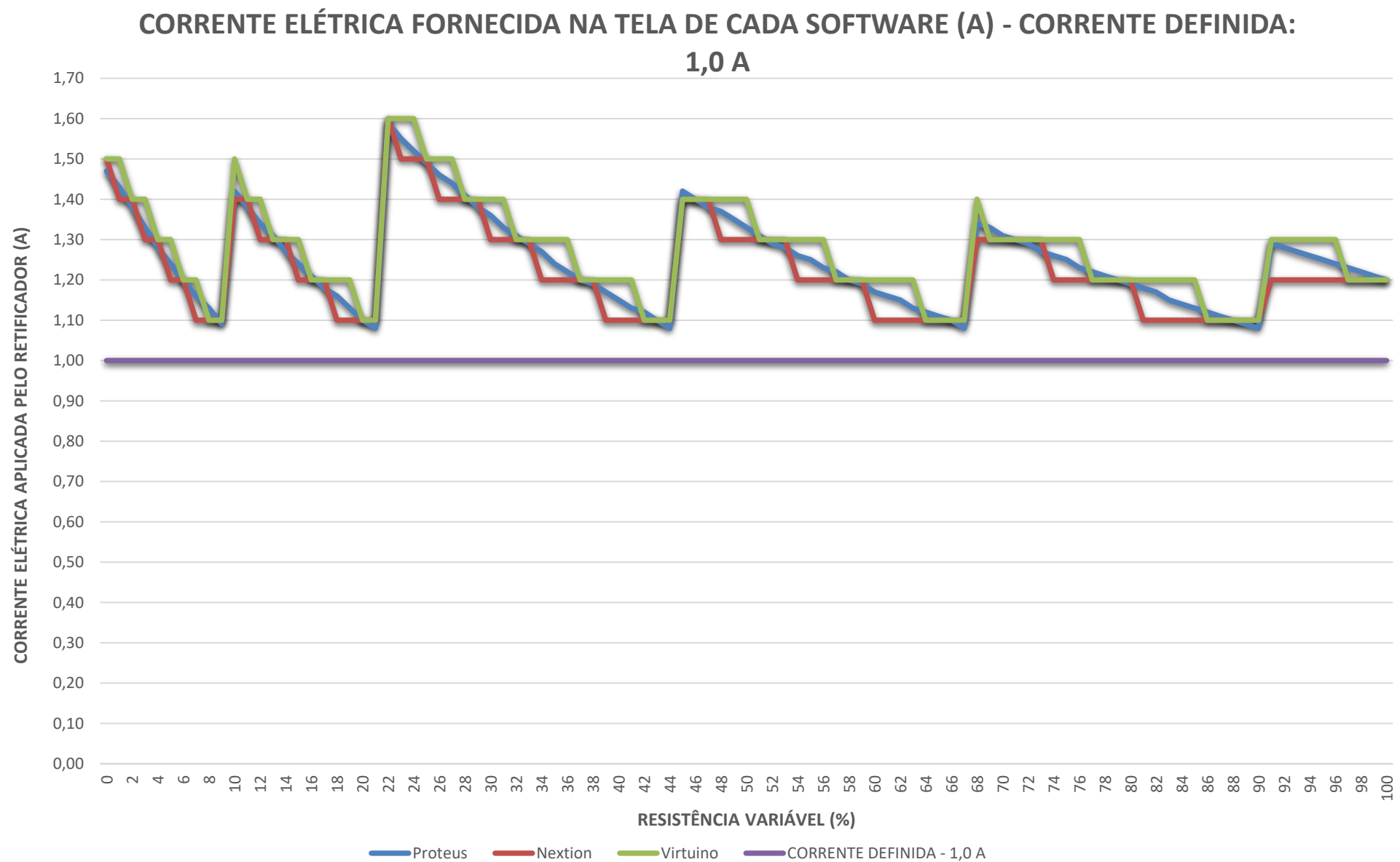
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 1 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada *software* utilizado no projeto para o ajuste de 0,5 A



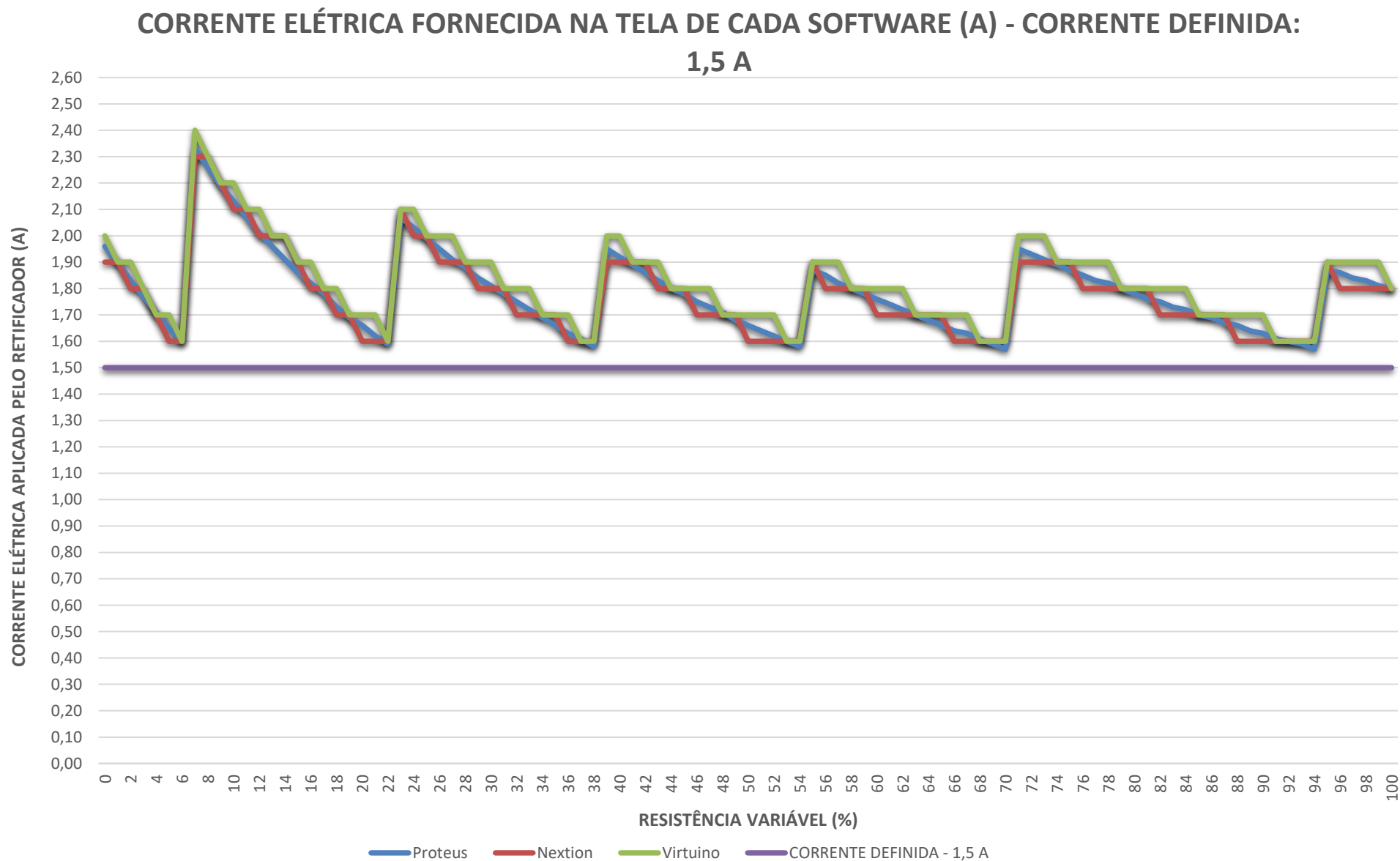
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 2 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada software utilizado no projeto para o ajuste de 1,0 A



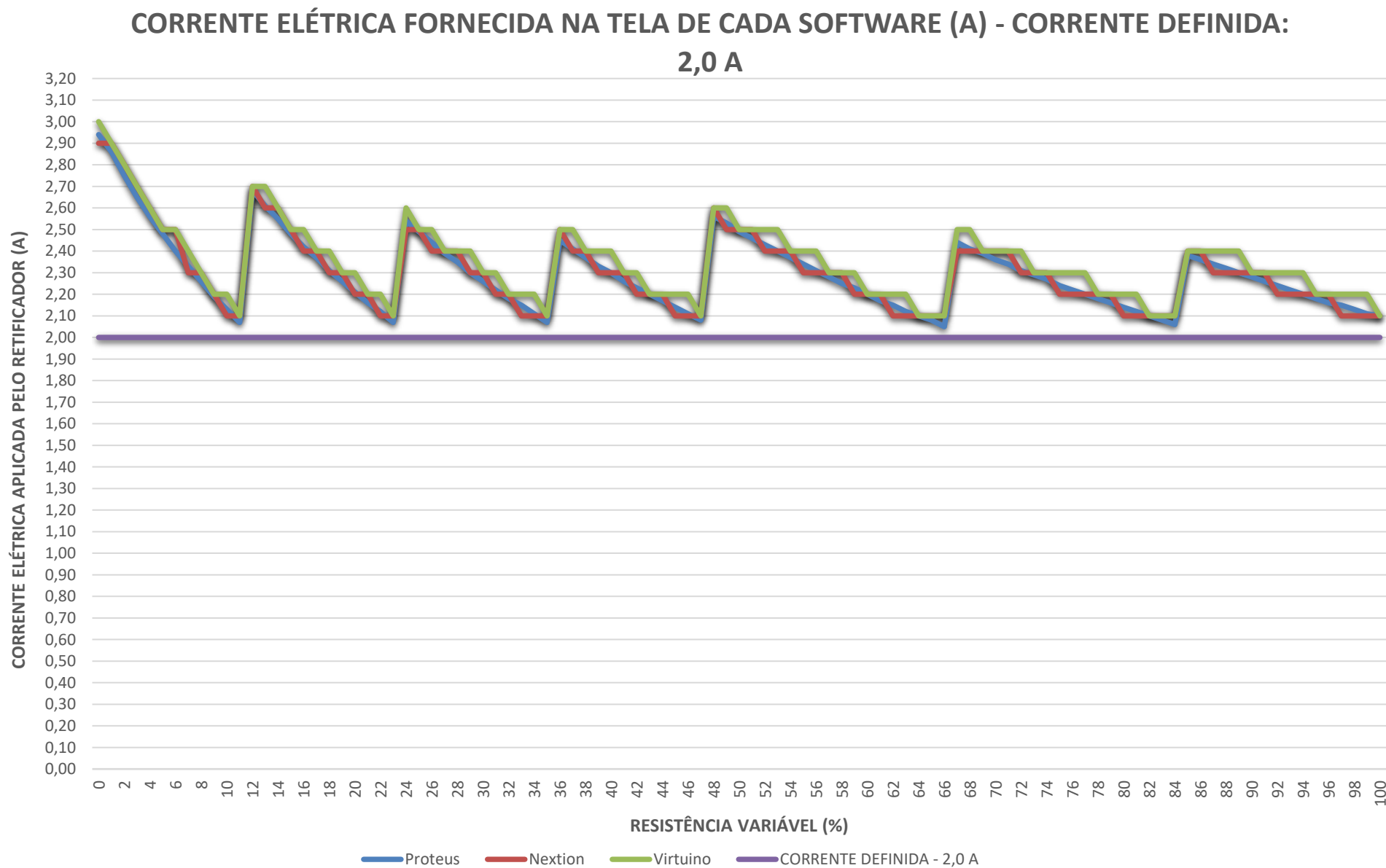
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 3 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada software utilizado no projeto para o ajuste de 1,5 A



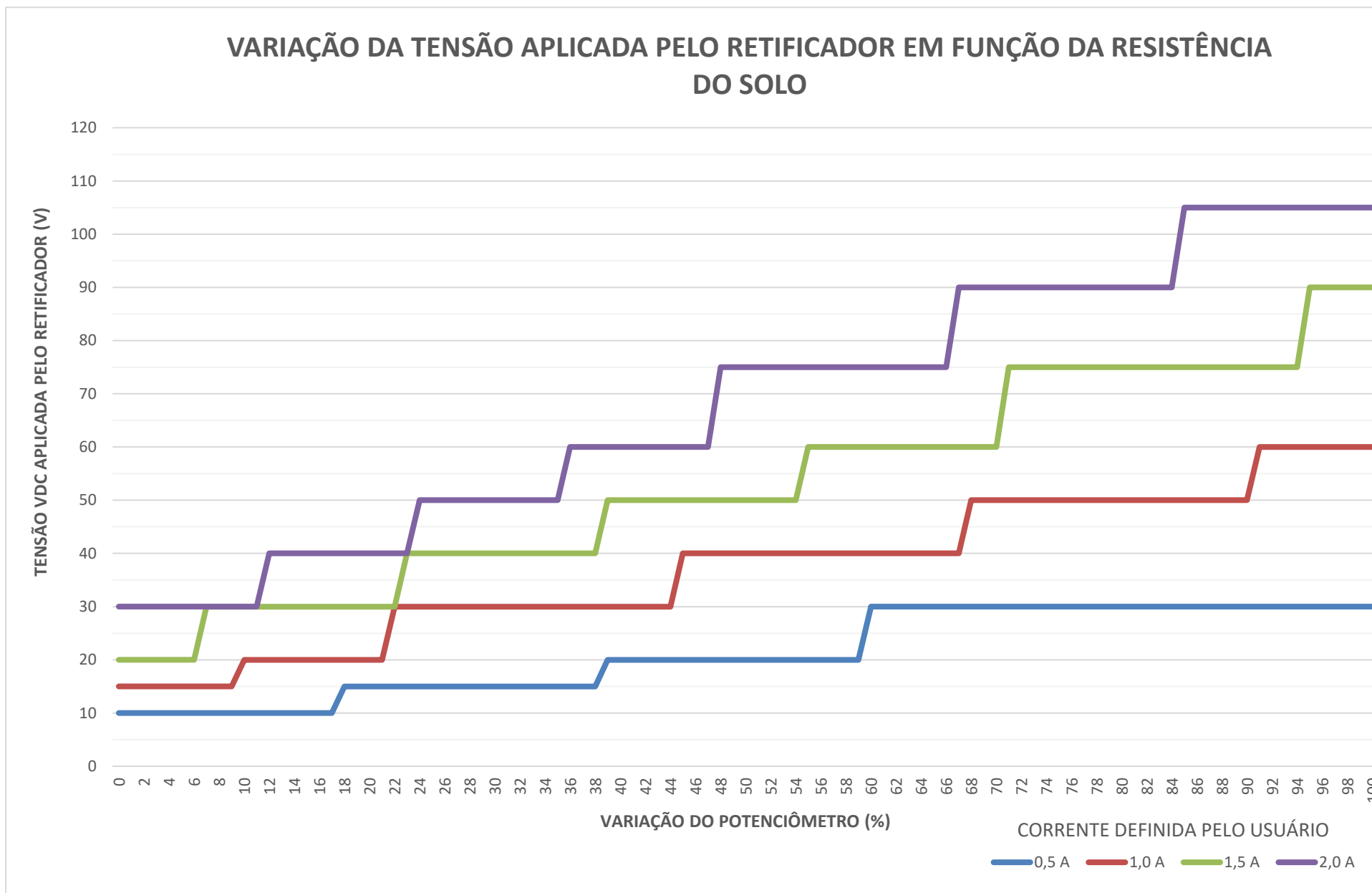
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 4 – Corrente elétrica fornecida na tela de cada software utilizado no projeto para o ajuste de 2,0 A



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 5 – Tensão VDC aplicada pelo retificador de acordo coma resistência do solo



6.1. RESULTADOS DA OPERAÇÃO EM “MODO MANUAL”

Analisando-se a Tabela 7 é possível observar que as diferenças de valores informados na tela de cada *software*, quando ocorrem, é praticamente sempre de 0,1 A. Essa diferença é justificada pelo fato de cada *software* utilizar um método para arredondamento de valores. Como é possível observar nessa tabela, o próprio *Proteus* – que é um *software* de simulação e, portanto, deveria informar os valores ideais (ou seja, sem perdas) – informa um valor que corresponde a 98% do valor ideal para todos os casos em que o potenciômetro estava em 0%. À medida que se aumenta a resistência variável essa diferença (de 2% entre o valor ideal e o valor informado pelo *software*) vai diminuindo até que deixa de existir, como é possível observar ao analisarmos todos os casos em que o potenciômetro estava em 100%. Ainda na Tabela 7, conseguimos perceber que o *Nextion* tem uma tendência de fazer o arredondamento para baixo – mantendo em sua casa decimal o valor da primeira casa decimal do *Proteus* por mais tempo – enquanto o *Virtuino* tem uma tendência de fazer o arredondamento para cima e, assim, ele mantém por menos tempo em sua casa decimal o valor da primeira casa decimal do *Proteus*. Como já foi explicado, essa diferença não se trata de um erro e, sim, de padrões de construção de cada *software* e, assim sendo, pode-se concluir que os resultados obtidos na operação do projeto em “Modo Manual” foram conforme esperado.

6.2. RESULTADOS DA OPERAÇÃO EM “MODO AUTOMÁTICO”

O Gráfico 1 mostra que, para a corrente definida de 0,5 A, o sistema operou conforme projetado. É possível observar que em momento algum a corrente mínima fornecida pelo sistema sequer chega ao valor de 0,5 A, mantendo-se sempre um pouco acima desse valor como fator de segurança. Ao se analisar a Tabela 8, percebe-se que a diferença mínima foi de 0,09 A. Também pode-se verificar que a corrente máxima fornecida pelo sistema foi de 0,98 A, ou seja, um valor de superproteção de 96% e, portanto, muito inferior ao valor prejudicial de proteção excessiva, que é acima de 300%.

O Gráfico 2 mostra que, para a corrente definida de 1,0 A, o sistema também operou conforme projetado. É possível observar que em momento algum a corrente mínima fornecida pelo sistema sequer chega ao valor de 1,0 A, mantendo-se sempre um pouco acima desse valor como fator de segurança. Ao se analisar a Tabela 8, percebe-se que a diferença mínima foi de 0,08 A. Também pode-se verificar que a corrente máxima fornecida pelo sistema foi de 1,59 A, ou seja, um valor de superproteção de 59% e, portanto, muito inferior ao valor prejudicial de proteção excessiva, que é acima de 300%.

O Gráfico 3 mostra que, para a corrente definida de 1,5 A, o sistema também operou conforme projetado. É possível observar que em momento algum a corrente mínima fornecida pelo sistema sequer chega ao valor de 1,5 A, mantendo-se sempre um pouco acima desse valor como fator de segurança. Ao se analisar a Tabela 8, percebe-se que a diferença mínima foi de 0,07 A. Também pode-se verificar que a corrente máxima fornecida pelo sistema foi de 2,33 A, ou seja, um valor de superproteção de 55% e, portanto, muito inferior ao valor prejudicial de proteção excessiva, que é acima de 300%.

O Gráfico 4 mostra que, para a corrente definida de 2,0 A, o sistema também operou conforme projetado. É possível observar que em momento algum a corrente mínima fornecida pelo sistema sequer chega ao valor de 2,0 A, mantendo-se sempre um pouco acima desse valor como fator de segurança. Ao se analisar a Tabela 8, percebe-se que a diferença mínima foi de 0,05 A. Também pode-se verificar que a corrente máxima fornecida pelo sistema foi de 2,94 A, ou seja, um valor de superproteção de 47% e, portanto, muito inferior ao valor prejudicial de proteção excessiva, que é acima de 300%.

O Gráfico 5 mostra que o retificador vai aumentando a tensão VDC fornecida para o sistema duto-solo à medida que a resistência do solo vai aumentando. É possível observar que o MCU é capaz de selecionar a tensão mais adequada para cada valor de resistência e executar de forma autônoma a mudança entre os TAPs disponíveis.

Tendo analisado toda Tabela 8 (e todos os 5 gráficos gerados a partir dela), pode-se concluir que os resultados obtidos na operação do projeto em “Modo Automático” também foram conforme esperado e, dessa forma, é possível afirmar que o projeto funciona de forma correta e é adequado para uso em sistemas de proteção catódica em tubulações subterrâneas.

6.3. APLICAÇÃO PRÁTICA BASEADA NO PROJETO

Tendo como base todos os resultados positivos apresentados nesse trabalho, a GASMIG decidiu aplicar as premissas utilizadas e os conhecimentos adquiridos ao longo do desenvolvimento desse projeto na automatização de seus retificadores instalados.

Nos últimos anos, alguns CLPs antigos (*Altus Série Duo*) foram retirados de campo pois eles eram utilizados para o controle de um tipo de sistema de odorização do Gás Natural (conhecido como SOD) que ficou obsoleto. O Gás Natural é um gás inodoro e, por questões de segurança, a legislação exige que ele seja odorizado pelas distribuidoras. Essa odorização é feita com mercaptanas líquidas, que são injetadas por uma bomba diretamente no gasoduto. Os SODs da GASMIG eram muito antigos e foram substituídos por sistemas mais modernos nos últimos anos. Com isso, os CLPs que operavam esses sistemas obsoletos foram retirados de campo e estavam sem utilidade, ainda que apresentassem bom funcionamento. Notoriamente, o CLP é um dispositivo muito mais poderoso do que os dispositivos utilizados nesse projeto (que tem o objetivo de ser didático e de baixo custo, através da utilização de componentes mais simples) e, assim sendo, ele é utilizado de forma análoga ao funcionamento do *display Nextion* combinado com o MCU PIC18F45K22, ou seja, como IHM e como centro de análises e tomadas de decisão e de envio de dados. Os CLPs possuem linguagens de programação próprias e, nesse caso, a linguagem utilizada para programação foi a “Texto Estruturado”, que é uma linguagem de alto nível estruturada em blocos – geralmente usada em aplicações que envolvem manipulação de dados e aplicações matemáticas, como é o caso. Por não ser tema desse projeto e por questões de proteção de dados, o código usado para essa adequação não será disponibilizado nesse trabalho.

Foi definido que as adequações dos retificadores manuais seriam feitas em 3 etapas, conforme apresentado a seguir:

- Etapa 1: Instalação física dos CLPs nos retificadores manuais. Essa etapa já foi concluída e hoje todos os retificadores já contam com um CLP instalado. A Foto 8 mostra um retificador instalado no início do

gasoduto que abastece a RMBH, próximo à REGAP (Refinaria Gabriel Passos – PETROBRÁS) na cidade de Betim.

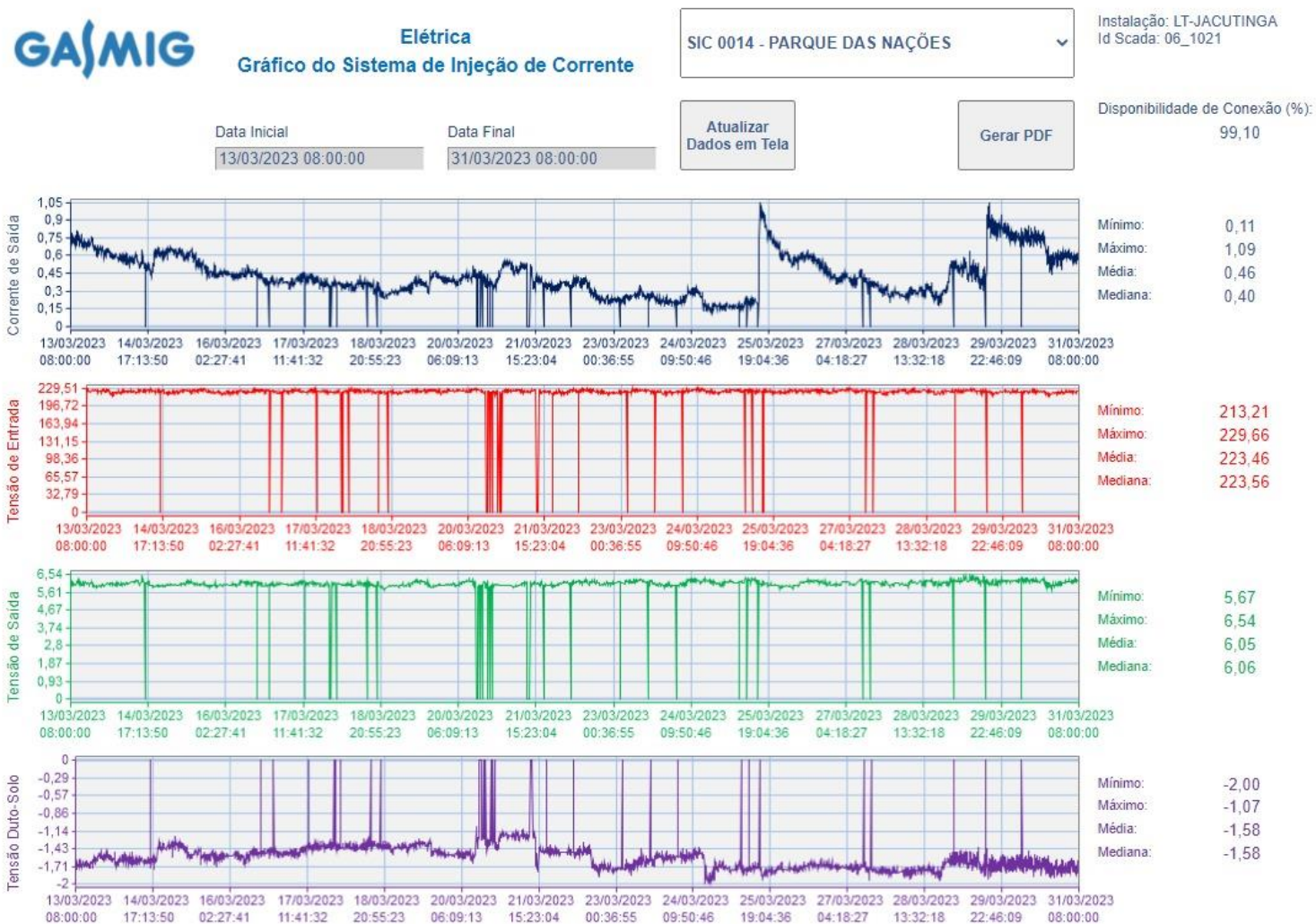
Foto 8 – Automação de um retificador manual



Fonte: Acervo de fotos da GASMIG (2020)

- Etapa 2: Ligação elétrica dos CLPs e dos relés para acionamento dos TAPs do transformador e envio dos dados dos parâmetros para GASMIG. Essa etapa também já foi concluída e hoje todos os retificadores têm operação manual via IHM do próprio CLP e enviam os dados relevantes para acompanhamento na GASMIG. A Figura 25 apresenta como essas informações são recebidas na GASMIG.

Figura 25 – Dados recebidos remotamente de um retificador instalado no SDGN da GASMIG



Fonte: Sistema de monitoramento de proteção catódica da GASMIG (2023)

- Etapa 3: Operação do sistema de forma automática, operado pelo CLP. Essa é a última etapa e encontra-se na fase final de testes. Conforme já mencionado, o conhecimento obtido ao longo do desenvolvimento desse trabalho tem sido utilizado para que essa etapa final seja implementada assim que possível.

6.4. POSSÍVEIS MELHORIAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a crescente mobilização mundial em torno da sustentabilidade, a preocupação com a sustentabilidade dos negócios não é mais um interesse segmentado no mercado, ela já se transformou em prioridade para toda a indústria. A sustentabilidade é a busca por um equilíbrio entre os aspectos

econômicos, sociais e ambientais, visando a preservação do meio ambiente, a justiça social e o desenvolvimento econômico de forma responsável. É um conceito fundamental para enfrentar os desafios ambientais e sociais do nosso tempo, buscando soluções que atendam às necessidades presentes sem comprometer as oportunidades e o bem-estar das futuras gerações.

Nesse cenário, a energia solar vem se destacando cada vez mais, pois ela é uma fonte de energia renovável e limpa, o que significa que sua utilização não emite gases de efeito estufa ou poluentes. Ao optar pela energia fotovoltaica, as pessoas contribuem para a redução das emissões de carbono e ajudam a combater as mudanças climáticas. Além disso ajudam na melhoria da qualidade do ar, na conservação dos recursos naturais e na preservação da biodiversidade.

Como o retificador de corrente impressa é um dispositivo elétrico, que é diretamente ligado no sistema de abastecimento de energia elétrica das concessionárias (como a CEMIG), ele pode ser abastecido com energia fotovoltaica. Para isto, basta que seja feito um projeto específico para tal. Além de toda questão ambiental já citada, este projeto traria outros benefícios como a economia dos custos de energia elétrica e até mesmo uma possível independência energética, o que garantiria seu funcionamento mesmo em eventuais faltas de energia elétrica local.

Mesmo na impossibilidade do uso da energia fotovoltaica por algum fator, sugere-se explorar a possibilidade de integração de um retificador de corrente impressa com outros sistemas de armazenamento de energia, como baterias ou supercapacitores. Isso permitiria a utilização de energia elétrica de forma mais eficiente e flexível.

Ainda como direção futura, é sugerido a implementação do acionamento e operação do retificador de corrente impressa de forma remota. O aplicativo *web* utilizado no projeto (*Virtuino*) permite esse tipo de operação e essa melhoria não foi adicionada ao projeto pois demandaria ainda mais pesquisas e testes, o que, consequentemente, exigiria um prazo de entrega maior do que o prazo disponível.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento do projeto, foram alcançados resultados significativos que contribuem para o avanço no campo dos retificadores de corrente impressa. Primeiramente, realizou-se uma revisão detalhada da literatura sobre o problema que se faz necessário controlar, reduzir ou até mesmo inibir sua ocorrência (corrosão em dutos terrestres enterrados), identificando as principais técnicas e tecnologias utilizadas atualmente. Isso nos permitiu estabelecer uma base sólida de conhecimento para o desenvolvimento do projeto.

Em seguida, foi projetado e implementado um projeto de retificador de corrente impressa utilizando uma abordagem inovadora baseada em um sistema operado por uma IHM moderna e de baixo custo (*display Nextion*) e controlada por um MCU (PIC 18F45K22), que é um dispositivo de programação simples, baixo custo e de fácil acesso. Realizou-se simulações e testes para verificar o desempenho do retificador em diferentes condições de carga e modo de operação. Os resultados experimentais mostraram que o retificador desenvolvido apresenta um funcionamento significativamente melhor em relação aos retificadores manuais instalados no SDGN da GASMIG. Além disso, verificou-se que o retificador é capaz de operar automaticamente de forma estável e confiável fornecendo uma corrente CC sempre dentro da faixa segura para proteção efetiva dos dutos enterrados.

Esse trabalho exemplifica como o curso de Engenharia de Controle e Automação é importante para os mais diversificados setores da sociedade e como algumas ideias de projetos podem ser desenvolvidas por variados métodos e em diferentes plataformas. O desenvolvimento e teste desse projeto forneceram conhecimentos valiosos sobre as características de operação e desempenho desse tipo de sistema. Esses conhecimentos estão sendo utilizados na prática para aprimorar ainda mais a operação de todos os retificadores instalados no SDGN da GASMIG, com o intuito de torná-los autônomos em seus funcionamentos, otimizando sua eficiência e aumentando sua confiabilidade. Espera-se que os resultados obtidos nesse trabalho sirvam de base para pesquisas futuras e inspirem novas inovações no desenvolvimento desse tipo de sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 15589: Indústrias de petróleo, petroquímica e gás natural – Proteção catódica de sistemas de transporte por dutos**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2016.

CAPASCIUTTI, A. **Integridade de Dutos – Sistema de Proteção Catódica por Corrente Impressa**, 2015. Disponível em: <<https://www.egdengenharia.com.br/protacao-catodica-por-corrente-impressa/>>. Acesso em: 29 de outubro 2022.

DA SILVA SOARES, R. M. *et al.* **Análise da qualidade de energia como ferramenta na manutenção de retificadores para proteção catódica– estudo de caso**. Multiverso: Revista Eletrônica do Campus Juiz de Fora-IF Sudeste MG, v. 4, p. 309, 2019.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PUC-RIO. **Curso de Engenharia de Dutos**. Disponível em: <<http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/>> Atualizado em outubro/2013. Acesso em: 11 de maio de 2020.

DUTRA, A.; NUNES, L. **Proteção Catódica: Técnica de combate à corrosão**. 5.ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2011. 344p.

FREITAS, D. S. **Controle da Corrosão**. Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Corrosao_Control.pdf>. Atualizado em outubro/2013. Acesso em: 11 de maio de 2020.

GENTIL, V. **Corrosão**, 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2011.

GERVÁSIO, J. P. K. **Proteção Catódica. Efetivo Combate à Corrosão Eletroquímica. Parte 1: Introdução.** Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Prot_Catodica_Parte1.pdf> Atualizado em outubro/2013. Acesso em: 11 de maio de 2020.

GERVÁSIO, J. P. K. **Proteção Catódica. Efetivo Combate à Corrosão Eletroquímica. Parte 2: Proteção Catódica de Dutos Terrestres.** Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Prot_Catodica_Parte2.pdf> Atualizado em outubro/2013. Acesso em: 11 de maio de 2020.

IEC Engenharia. **O que é proteção catódica?**, 2020. Disponível em: <<https://www.iecengenharia.com.br/noticia/o-que-e-protecao-catodica/>>. Acesso em: 29 de outubro de 2022.

JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. **Corrosão – Fundamentos, monitoração e controle**, Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2008.

KOCH, G. **Cost of corrosion. Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies**, [S.l.], p. 3-30, June 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-101105-8.00001-2>>. Acesso em: 02 de novembro de 2022.

MAINIER, F. B. **Corrosão e revestimentos industriais**. UFF, 601 sl. Niterói, 2006.

MELLO, L. S. **Avaliação de corrosão de corrosão localizada dos aços inoxidáveis em sistemas de resfriamento industrial**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

NUNES, L. D. P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2014.

PEABODY, A. W. **Control of Pipeline Corrosion**. Houston, TX: NACE International, 2001. p. 21-38.

RESENDE, J. L. **Influência da variação anual da resistividade elétrica do solo no desempenho de sistema de proteção catódica de dutos**. São Paulo: INTERCORR, ABRACO, 2018. Disponível em: <https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2018/INTERCORR2018_233.pdf>. Acesso em: 11 de maio de 2020.

RIBEIRO, L. L. **Aumentar a qualidade do teste Salt-Spray, segundo a norma Internacional ISO 9227**. Universidade de São Paulo–USP, 2012. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2012/MEQ12029.pdf>>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2023.

ROBERGE, P. R. **Corrosion Engineering – Principles and Practice**. New York City, NY: McGraw-Hill, 2008. p. 14-16, 175, 385.

SERENÁRIO, M. E. D. **Avaliação da resistência à corrosão em temperaturas elevadas da tinta epóxi Nb2O5 aplicada na indústria química**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei, 2018.

SILVA, D. R. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade**; 2006. 194f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006.

VAZ, E. L. S.; ACCIARI, H. A.; CODARO, E. N. **Um método para avaliar a taxa de corrosão**. Química Nova, São Paulo, v. 34, n. 7, p.1288-1290, abr. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422011000700031>>. Acesso em: 02 de novembro de 2022.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (Edusp), 2003.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE

```

/*
 * Project name:
 *   TCC Thiago Djoseff
 * Copyright:
 *   (c) IFMG CAMPUS BETIM, 2023.
 *   Orientador: Helbert de Sá
 *   Aluno: Thiago Djoseff Pinheiro Reis
 * Revisão Histórica:
 *   20222508:
 *     - Versão 1;
 * Descrição:
 *   Esta aplicação trata-se de um "RETIFICADOR DE
 *   CORRENTE IMPRESSA" e o
 *   seu funcionamento se dá através da UART e
 *   conexão com uma Tela NEXTION.
 * Hardware configuração:
 *   MCU: PIC18F45k22
 *   Oscilador: 8.000000 MHz
 *   Ext. Modules: ESP8266
 *   SW: mikroC PRO for PIC v7.6.0
 * NOTAS:
 *   - Verificar simulações em PROTEUS/ISIS
 *   conectando com NEXTION EDITOR
 */

#include <built_in.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>

char uart_rd; // Leitura da UART
// Variáveis de valores com casas decimais
float centena, corrente, tensao, volts, cor_def,
comparsa, resistencia=0;
// Variáveis de valores inteiros
int i, eni, posicao, dezena, unidade, decimal1, cent,
dez, uni, dec, ten1, ten2, ten3;
float QOV=2.5; // Quiescent output voltage [model
ACS712ELCTR-20A-T] - fonte: Datasheet (página 9)
float sens=0.100; // Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)
[model ACS712ELCTR-20A-T] - fonte: Datasheet
(página 2)
float Adc_rd=0.0; // Valor recebido pelo MCU começa
com valor 0
int atualiza=0; // Responsável por atualizar os valores
no Nextion
int manual=0; // Responsável pelo envio de dados no
Modo Manual
int automatico=0; // Responsável pelo envio de dados
no Modo Automático
int meioA=0; // Responsável por iniciar a operação em
Modo Automático
// Vetor com valores disponíveis de tensão VDC
float vt[12] = {5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 30.0, 40.0, 50.0,
60.0, 75.0, 90.0, 105.0, 120.0};

//TESTE ESP8266
char trama_tx[100]; // Variável trama de enviar

// Variáveis para capturar a trama
char trama_rx[100];
char processa[100];
char dadorex; // Dado atual
char ponteiro=0; // Contador que vai apontando o
valor seguinte em trama_rx
char flag_rx=0; // Quando existem dados prontos para
processar
char flag_timer=0; // Tempo de espera por dados
seriais
char timer_cont=0; // Fator de multiplicação

// Estados de recepção

enum maq_estados {Adm,V_,fim};
char estado=Adm;
char num_var=0; // Conta o número de variáveis
const total_var=6; // Coloca o número total de
variáveis virtuais usadas

// Variáveis para ler analógico
unsigned int codigo;
char texto[20]; // Trama para transformar número para
string
char captu[30]; // Para processar o dado capturado

void Uart1_write_text_const(const char *info)
{
    while(*info) UART1_Write(*info++);
}

void soft_Uart_write_text(char *info)
{
    while(*info) Soft_UART_Write(*info++);
}

void soft_Uart_write_text_const(const char *info)
{
    while(*info) Soft_UART_Write(*info++);
}

void processarx()
{
    char variable;
    char son;

    // !V00=?$!V01=10$!V02=?$
    strcpy(processa, strtok(trama_rx, "V")); // Inicia
    captura de dados a partir de "V"

    for (son=0; son<total_var-1;son++)
    {
        strcpy(processa, strtok(0, "=")); // Captura até a "/"
        variable=atoi(processa);

        strcpy(processa, strtok(0, "$")); // Captura até o "$"

        strcpy(processa, strtok(0, "V")); // Aponta para a
        outra variável "V"
    }
}

void manda_AT_COMANDO(char *comando)
{
    Uart1_write_text(comando); // Manda o comando
    Uart1_write_text_const("\r\n"); // Manda o final da
    linha
}

void manda_esp8266(char *info)
{
    unsigned int longo;
    Uart1_write_text_const("AT+CIPSEND="); // Envia
    apenas constantes
    UART1_Write('0'); // Manda o pino que se conectou
    UART1_Write('.');
    longo=strlen(info); // Calcula o comprimento da trama
    a enviar
    sprinti(captu,"%1u",longo); // Comprimento da trama
    +2 (entrada e fim de linha)
    UART1_Write_Text(captu); // Envia o comprimento
    da trama
    Uart1_write_text_const("\r\n");
    Delay_ms(300); // Tempo de espera antes de enviar
    a trama

```

```

    Uart1_write_text(info); // Envia apenas constantes
    delay_ms(300); // Tempo de espera antes de enviar a
    trama
}

// Programa de interrupção
void interrupcion() iv 0x0008 ics ICS_AUTO
{
    if (RCIF_bit==1) // Se é serial
    {
        dadorex=UART1_Read(); // Lê o dado

        switch (estado) // Analiza a máquina de estado
        {
            case Adm: // Espera o ponto de exclamação
                trama_rx[ponteiro]=dadorex;
                if (dadorex!='!') ponteiro=0; // Se não são os dados
                que interessa
                else
                {
                    ponteiro++; // Incrementa o contador para próximo
                    dado
                    estado=V_; // Passa para o estado de capturar o
                    "V"
                }
                break;

            case V_: // Espera o "V"
                trama_rx[ponteiro]=dadorex;
                if (dadorex!='V')
                {
                    ponteiro=0;
                    estado=Adm; // Volta para o estado inicial
                }
                else
                {
                    ponteiro++; // Incrementa o contador para o
                    próximo dado
                    flag_timer=0; // Programa timer para receber
                    TMR1H=158; // Inicia o timer
                    TMR1L=88; // 50ms
                    TMR1IF_bit=0; // Limpa o conteúdo
                    TMR1IE_bit=1; // Habilita a interrupção
                    TMR1ON_bit=1; // Liga o timer
                    estado=fim; // Vai para o estado de capturar o
                    primeiro 0
                }
                break;

            case fim:
                trama_rx[ponteiro]=dadorex;
                ponteiro++;
                if (ponteiro>=100)
                {
                    ponteiro=0;
                    estado=Adm;
                }
        }

        if (flag_timer==1)
        {
            trama_rx[ponteiro]=0; // Adiciona final de linha
            RCIF_bit=0; // Desativa a interrupção
            flag_rx=1; // Sinaliza que há uma trama válida
            estado=Adm; // Reinicia o estado
            flag_timer=0; // Limpa o conteúdo do timer
        }
        break;
    } // Fim do estado de interrupção

    RCIF_bit=0; // Limpa o conteúdo de interrupção
} // Fim da interrupção serial

if (TMR1IF_bit==1) // Se o timer está habilitado
{
    timer_cont++;

    if (timer_cont>=4) // Tempo de espera 50ms*4=
    200ms para capturar toda trama
    {
        TMR1IE_bit=0; // Desativa a interrupção do timer
        TMR1ON_bit=0; // Para o timer
        timer_cont=0; // Limpa o contador do timer
        flag_timer=1;
    }
    TMR1IF_bit=0;
}
} //FIM DO TESTE DO ESP8266

void atualiza_NEXTION()
{
    if (abs(Adc_rd-ADC_Read(2)) >= 0.001)
    {
        Adc_rd = ADC_Read(2);
        atualiza = 1;
    }
    else atualiza = 0;
}

void calculo_corrente() // Programa para cálculo da
corrente no sistema
{
    for (i=0; i<20; i++) // Ler valor por 20 vezes
    {
        Adc_rd = ADC_Read(2); // Ler ADC (valor recebido
        pelo MCU do ACS712)
        tensao = Adc_rd*(5.0/1023.0); // Calcula o valor de
        tensão recebido
        corrente += ((tensao-QOV)/sens); // Calcula o valor
        da corrente correspondente
    }
    corrente/=20; //Média do valor que foi lido por 20
    vezes

    dezena = corrente/10; // Calcula o valor da dezena
    unidade = (corrente - dezena*10); // Calcula o valor
    da unidade
    decimal1 = ((corrente - dezena*10 - unidade*1)*10);
    // Calcula o valor decimal
}

void calculo_resistencia() // Programa para cálculo da
resistência do solo
{
    resistencia = volts/corrente; // Cálculo da resistência

    dez = resistencia/10; // Calcula o valor da dezena
    uni = (resistencia - dez*10); // Calcula o valor da
    unidade
    dec = ((resistencia - dez*10 - uni*1)*10); // Calcula o
    valor decimal
}

void exibe_tensao() // Programa para exibir a tensão
no Nextion
{
    ten1 = volts/100; // Calcula o valor da centena
    ten2 = ((volts - ten1*100)/10); // Calcula o valor da
    dezena
    ten3 = (volts - ten1*100 - ten2*10); // Calcula o valor
    da unidade
}

void modo_automatico() // Programa para operação
em Modo Automático
{
    if (meioA == 0)
    {
        PortB.B0 = 1; // Liga RB0
        volts = 5.0;
        meioA = 1;
        atualiza = 1;
    }
}

```

```

    delay_ms(100);
}

calculo_corrente();
calculo_resistencia();
delay_ms(100);

if (atualiza)
{
    for (eni=0; eni<12; eni++)
    {
        // Compara o valor da corrente que seria gerada por
        cada
        // opção de tensão disponível com a resistência
        atual do
        // solo e a corrente que foi definida no Nextion
        compara = ((vt[eni]/resistencia)-cor_def);
        if (compara >= 0.1)
            break;
    }
    posicao = eni;

    if (posicao == 0)
    {
        PortB.B0 = 1; // Liga RB0
        PORTB.B1 = 0;
        PORTB.B2 = 0;
        PORTB.B3 = 0;
        PORTB.B4 = 0;
        PORTB.B5 = 0;
        PORTB.B6 = 0;
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 5.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }
    if (posicao == 1)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 1; // Liga RB1
        PORTB.B2 = 0;
        PORTB.B3 = 0;
        PORTB.B4 = 0;
        PORTB.B5 = 0;
        PORTB.B6 = 0;
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 10.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }
    if (posicao == 2)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 0;
        PORTB.B2 = 1; // Liga RB2
        PORTB.B3 = 0;
        PORTB.B4 = 0;
        PORTB.B5 = 0;
        PORTB.B6 = 0;
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 15.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }

    if (posicao == 3)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 0;
        PORTB.B2 = 0;
        PORTB.B3 = 1; // Liga RB3
        PORTB.B4 = 0;
        PORTB.B5 = 0;
        PORTB.B6 = 0;
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 20.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }
    if (posicao == 4)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 0;
        PORTB.B2 = 0;
        PORTB.B3 = 0;
        PORTB.B4 = 1; // Liga RB4
        PORTB.B5 = 0;
        PORTB.B6 = 0;
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 30.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }
    if (posicao == 5)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 0;
        PORTB.B2 = 0;
        PORTB.B3 = 0;
        PORTB.B4 = 0;
        PORTB.B5 = 1; // Liga RB5
        PORTB.B6 = 0;
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 40.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }
    if (posicao == 6)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 0;
        PORTB.B2 = 0;
        PORTB.B3 = 0;
        PORTB.B4 = 0;
        PORTB.B5 = 0;
        PORTB.B6 = 1; // Liga RB6
        PORTB.B7 = 0;
        PORTD.B0 = 0;
        PORTD.B1 = 0;
        PORTD.B2 = 0;
        PORTD.B3 = 0;
        volts = 50.0;
        automatico = 1;
        delay_ms(100);
    }
    if (posicao == 7)
    {
        PortB.B0 = 0;
        PORTB.B1 = 0;

```

```

PORTB.B2 = 0;
PORTB.B3 = 0;
PORTB.B4 = 0;
PORTB.B5 = 0;
PORTB.B6 = 0;
PORTB.B7 = 1; // Liga RB7
PORTD.B0 = 0;
PORTD.B1 = 0;
PORTD.B2 = 0;
PORTD.B3 = 0;
volts = 60.0;
automatico = 1;
delay_ms(100);
}
if (posicao == 8)
{
PortB.B0 = 0;
PORTB.B1 = 0;
PORTB.B2 = 0;
PORTB.B3 = 0;
PORTB.B4 = 0;
PORTB.B5 = 0;
PORTB.B6 = 0;
PORTB.B7 = 0;
PORTD.B0 = 0;
PORTD.B1 = 0;
PORTD.B2 = 0;
PORTD.B3 = 1; // Liga RD3
volts = 75.0;
automatico = 1;
delay_ms(100);
}
if (posicao == 9)
{
PortB.B0 = 0;
PORTB.B1 = 0;
PORTB.B2 = 0;
PORTB.B3 = 0;
PORTB.B4 = 0;
PORTB.B5 = 0;
PORTB.B6 = 0;
PORTB.B7 = 0;
PORTD.B0 = 0;
PORTD.B1 = 0;
PORTD.B2 = 1; // Liga RD2
PORTD.B3 = 0;
volts = 90.0;
automatico = 1;
delay_ms(100);
}
if (posicao == 10)
{
PortB.B0 = 0;
PORTB.B1 = 0;
PORTB.B2 = 0;
PORTB.B3 = 0;
PORTB.B4 = 0;
PORTB.B5 = 0;
PORTB.B6 = 0;
PORTB.B7 = 0;
PORTD.B0 = 0;
PORTD.B1 = 1; // Liga RD1
PORTD.B2 = 0;
PORTD.B3 = 0;
volts = 105.0;
automatico = 1;
delay_ms(100);
}
if (posicao == 11)
{
PortB.B0 = 0;
PORTB.B1 = 0;
PORTB.B2 = 0;
PORTB.B3 = 0;
PORTB.B4 = 0;
PORTB.B5 = 0;
PORTB.B6 = 0;
PORTB.B7 = 0;
PORTD.B0 = 0;
PORTD.B1 = 0;
PORTD.B2 = 0;
PORTD.B3 = 0;
volts = 120.0;
automatico = 1;
delay_ms(100);
}
}
}

void comunica() // Programa para comunicação com o
Nextion
{
if (atualiza)
{
calculo_corrente();
calculo_resistencia();
exibe_tensao();

if (manual)
{
UART2_Write_Text("page 10"); // Envia os dados
para a página 10
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
delay_ms(100);

UART2_Write_Text("co.val="); // Dados de corrente
UART2_Write(48+dezena);
UART2_Write(48+unidade);
UART2_Write(48+decimal1);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
delay_ms(100);

UART2_Write_Text("re.val="); // Dados de
resistência
UART2_Write(48+dez);
UART2_Write(48+uni);
UART2_Write(48+dec);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
delay_ms(100);
}

if (automatico)
{
UART2_Write_Text("page 6"); // Envia os dados
para a página 6
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
delay_ms(100);

UART2_Write_Text("x0.val="); // Dados de corrente
UART2_Write(48+dezena);
UART2_Write(48+unidade);
UART2_Write(48+decimal1);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
delay_ms(100);

UART2_Write_Text("x1.val="); // Dados de tensão
UART2_Write(48+ten1);
UART2_Write(48+ten2);
UART2_Write(48+ten3);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
UART2_Write(0xff);
}
}
}

```

```

    delay_ms(100);

    UART2_Write_Text("x2.val="); // Dados de
    resistência
    UART2_Write(48+dez);
    UART2_Write(48+uni);
    UART2_Write(48+dec);
    UART2_Write(0xff);
    UART2_Write(0xff);
    UART2_Write(0xff);
    delay_ms(100);
}
}
}

void main()
{
    ANSELA = 00000100; // Seta o canal do pino AN2
    como analógico
    ANSELB = 00000000;
    ANSELC = 00000000;
    ANSELD = 00000000;

    TRISA = 11111111; // Seta o canal A inteiro como
    entrada
    TRISB = 00000000;
    TRISC = 10000000; // Seta o canal do pino RC7
    (RX1) como entrada
    TRISD = 10000000; // Seta o canal do pino RD7
    (RX2) como entrada

    UART1_Init(9600); // Inicializa a UART1 com 9600
    bps
    delay_ms(100); // Espera a UART1 se estabilizar

    UART2_Init(9600); // Inicializa a UART2 com 9600
    bps
    Delay_ms(100); // Espera a UART2 se estabilizar

    PORTA = 00000100; // Garante que o PortA.B2
    comece ligado
    PORTB = 00000000; // Garante que o PortB comece
    desligado
    PORTC = 11000000; // Garante que o RX1 e TX1
    comecem ligado
    PORTD = 11000000; // Garante que o RX2 e TX2
    comecem ligado

    LATA = 00000100; // Garante que o PortA.B2
    comece ligado
    LATB = 00000000; // Garante que o PortB comece
    desligado
    LATC = 11000000; // Garante que o RX1 e TX1
    comecem ligado
    LATD = 11000000; // Garante que o RX2 e TX2
    comecem ligado

    UART1_Write_Text("OK INICIADO!"); // Texto para
    confirmação de comunicação
    UART1_Write(13); // Comando que pula a linha e
    visualiza no virtual terminal
    UART1_Write(10);

    UART2_Write_Text("CONECTADO!"); // Texto para
    confirmação de comunicação
    UART2_Write(13); // Comando que pula a linha e
    visualiza no virtual terminal
    UART2_Write(10);

    //TESTE ESP8266
    Soft_UART_Init(&PORTA, 2, 1, 9600, 0); // Inicializa
    uma porta a 9600 bps

    manda_AT_COMANDO("ATE0"); // Sem repetições
    delay_ms(2000);

    manda_AT_COMANDO("AT+CWMODE=2"); //
    Funciona como um roteador criando sua própria rede
    delay_ms(200);
    manda_AT_COMANDO("AT+CIPSERVER=0"); //
    Fecha sevidores
    delay_ms(200);
    manda_AT_COMANDO("AT+CIPMUX=0"); // Coloca
    uma conexão única
    delay_ms(200);
    manda_AT_COMANDO("AT+CIPMODE=0"); //
    Trabalha em modo normal
    delay_ms(200);
    // Cria uma rede WIFI como ponto de acesso no canal
    5 e chave tipo WPA2_PSK
    manda_AT_COMANDO("AT+CWSAP=\"TCC
    THIAGO DJOSEFF\", \"12345678\", 5, 3");
    delay_ms(600);
    // Coloca o IP do ponto de acesso

    manda_AT_COMANDO("AT+CIPAP=\"192.168.1.254\
    "");
    delay_ms(200);
    manda_AT_COMANDO("AT+CIPMUX=1"); // Habilita
    múltiplas conexões
    delay_ms(200);
    // Ativa a comunicação na porta 100
    manda_AT_COMANDO("AT+CIPSERVER=1,100");
    delay_ms(200);
    // Tempo em que atua como servidor (em segundos)
    manda_AT_COMANDO("AT+CIPSTO=0"); // 0
    significa sempre (o tempo todo)
    delay_ms(200);

    INTCON=0b01000000; // Habilita interrupções de
    periféricos

    RCIF_bit=0; // Limpa o canal de interrupção serial
    RCIE_bit=1; // Habilita a interrupção serial

    // LIMPA ERROS DE RECEPÇÃO
    RCEN_bit=0;
    RCEN_bit=1;
    // CONFIGURA TIMER 1
    T1CON=0;
    // INTERVALO DE 50ms
    TMR1H=158;
    TMR1L=88;
    // PRÉ ESCALA DE 4
    T1CKPS1_bit=1;
    T1CKPS0_bit=0;

    TMR1ON_bit=0; // Reseta o timer
    TMR1IF_bit=0; // Limpa o conteúdo

    GIE_bit=1; // Autoriza todas as interrupções
    programadas
    delay_ms(100);

    soft_Uart_write_text_const("INICIANDO"); // Texto
    para confirmação de comunicação
    //FIM TESTE ESP8266

    while (1)
    {
        if (UART2_Data_Ready()) //
        {
            uart_rd = UART2_Read(); // Lê o valor na entrada
            RX do dado recebido
        }

        if (uart_rd == 48) // 48 é o código ASCII do número
        0 (zero)
        {
            PORTB = 0; // Desliga o PortB
            PORTD.B0 = 0; // Desliga RD0
            PORTD.B1 = 0; // Desliga RD1
        }
    }

```

```

PORTD.B2 = 0; // Desliga RD2
PORTD.B3 = 0; // Desliga RD3
corrente = 0;
volts = 0;
resistencia = 0;
meioA = 0;
manual = 0;
automatico = 0;
delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 65) // 65 é o código ASCII da letra A
{
    PortB.B0 = 1; // Liga RB0
    volts = 5.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 66) // 66 é o código ASCII da letra B
{
    PortB.B1 = 1; // Liga RB1
    volts = 10.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 67) // 67 é o código ASCII da letra C
{
    PortB.B2 = 1; // Liga RB2
    volts = 15.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 68) // 68 é o código ASCII da letra D
{
    PortB.B3 = 1; // Liga RB3
    volts = 20.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 69) // 69 é o código ASCII da letra E
{
    PortB.B4 = 1; // Liga RB4
    volts = 30.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 70) // 70 é o código ASCII da letra F
{
    PortB.B5 = 1; // Liga RB5
    volts = 40.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 71) // 71 é o código ASCII da letra G
{
    PortB.B6 = 1; // Liga RB6
    volts = 50.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 72) // 72 é o código ASCII da letra H
{
    PortB.B7 = 1; // Liga RB7
    volts = 60.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 73) // 73 é o código ASCII da letra I
{
    PortD.B3 = 1; // Liga RC3
    volts = 75.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 74) // 74 é o código ASCII da letra J
{
    PortD.B2 = 1; // Liga RC2
    volts = 90.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 75) // 75 é o código ASCII da letra K
{
    PortD.B1 = 1; // Liga RC1
    volts = 105.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 76) // 76 é o código ASCII da letra L
{
    PortD.B0 = 1; // Liga RC0
    volts = 120.0;
    manual = 1;
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 49) // 49 é o código ASCII do número
1 (um)
{
    cor_def = 0.5;
    modo_automatico();
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 50) // 50 é o código ASCII do número
2 (dois)
{
    cor_def = 1.0;
    modo_automatico();
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 51) // 51 é o código ASCII do número
3 (três)
{
    cor_def = 1.5;
    modo_automatico();
    delay_ms(100);
}

if (uart_rd == 52) // 52 é o código ASCII do número
4 (quatro)
{
    cor_def = 2.0;
    modo_automatico();
    delay_ms(100);
}

//COMUNICAÇÃO ESP8266
if (flag_rx==1)
{
    soft_Uart_write_text_const("\r\n RECEBIDO=");
    soft_Uart_write_text(trama_rx); // Cria a trama
    processarx(); // Monta o formato da trama
    delay_ms(100);
    // Abastece a trama com o valores pertinentes

    sprintf(trama_tx, "!V00=%0.1f$!V01=%0.1f$!V02=%0.1f",
    corrente, volts, resistencia);
    manda_esp8266(trama_tx); // Envia a trama

```

```
ponteiro=0; // Inicializa a contagem
memset(trama_rx,0,100); // Limpa a trama
flag_rx=0;
delay_ms(200);

// LIMPA ERROS DE RECEPÇÃO
CREN_bit=0;
CREN_bit=1;

RCIF_bit=0; // Limpa o sinalizador de interrupção
RCIE_bit=1; // Habilita a interrupção serial
}
//FIM COMUNICAÇÃO ESP8266

atualiza_NEXTION();
comunica();
}
}
```

APÊNDICE B – TELAS DO NEXTION

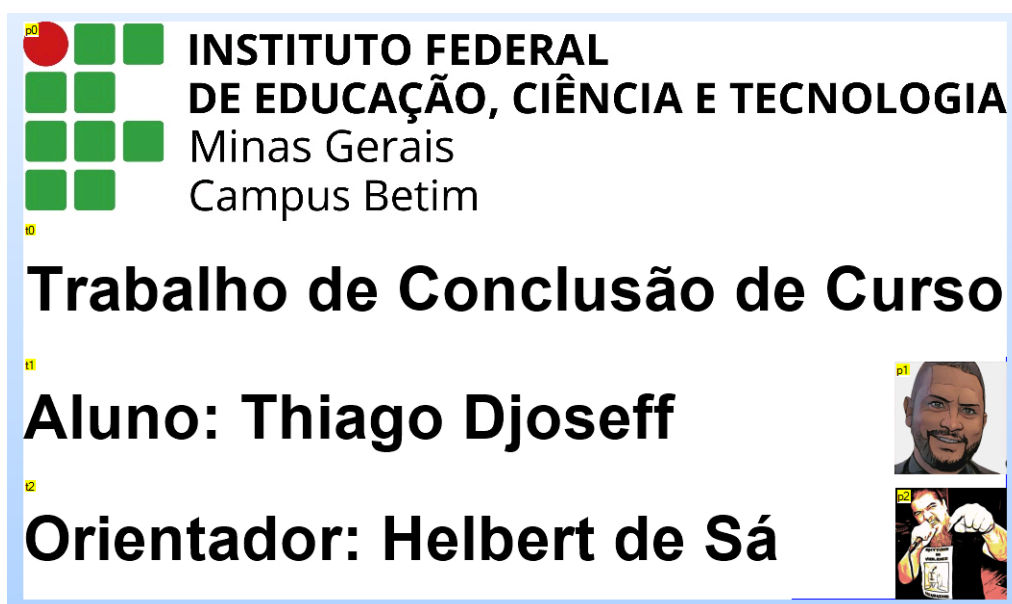
Figura 26 – Página 0 (“Abertura”)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de abertura do projeto. Ela não possui função no retificador, foi colocada apenas para apresentação. Ela fica disponível por 5 segundos até que o display passa a mostrar a próxima página.

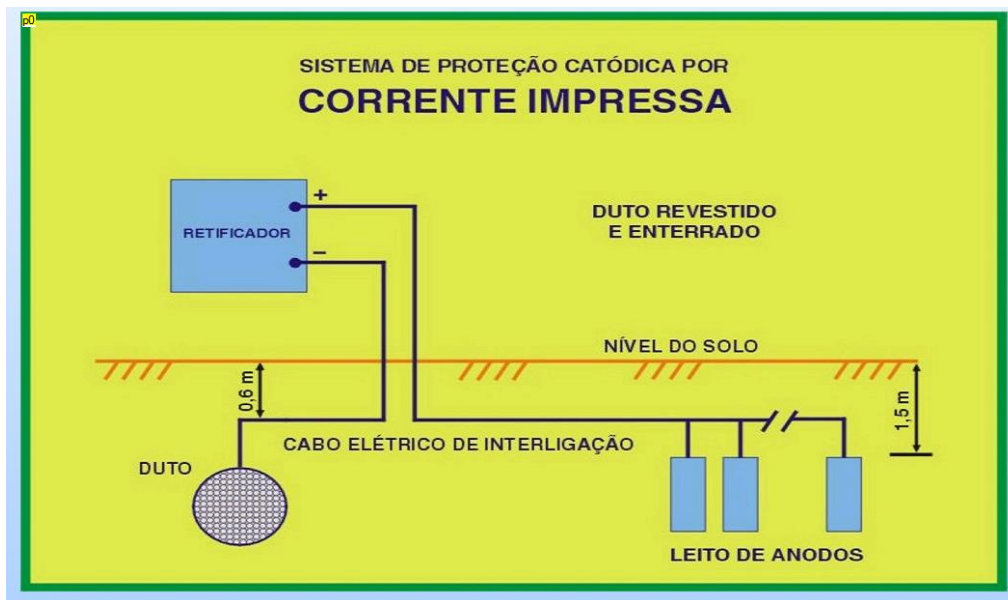
Figura 27 – Página 1 (“Apresentacao”)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de apresentação do autor do projeto. Ela não possui função no retificador, foi colocada apenas para apresentação. Ela fica disponível por 5 segundos até que o display passa a mostrar a próxima página.

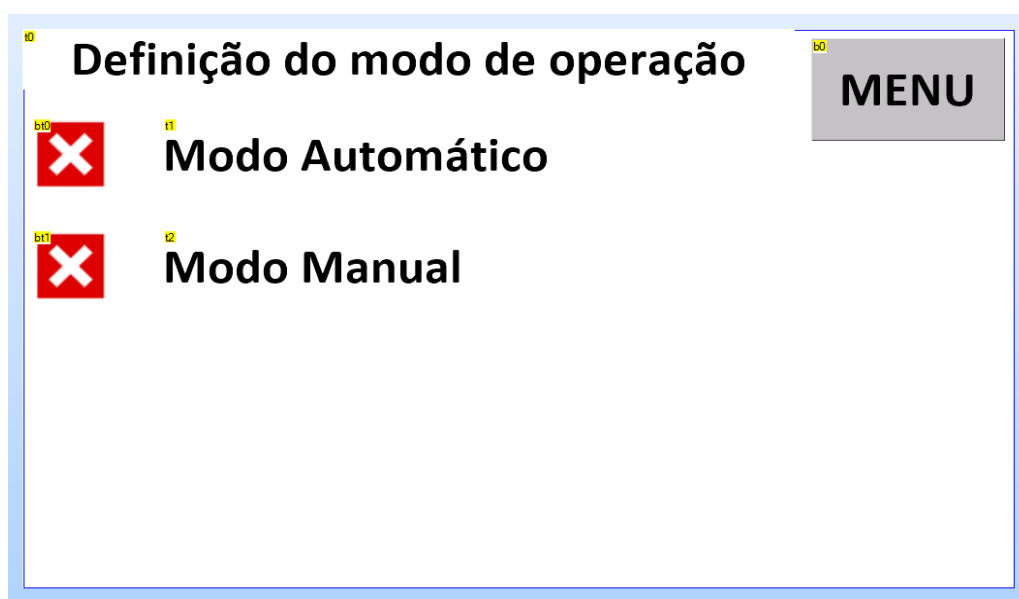
Figura 28 – Página 2 (“Tema”)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de apresentação do tema do projeto. Ela não possui função no retificador, foi colocada apenas para apresentação. Ela fica disponível por 5 segundos até que o display passa a mostrar a próxima página.

Figura 29 – Página 3 (“InicioRCI”)

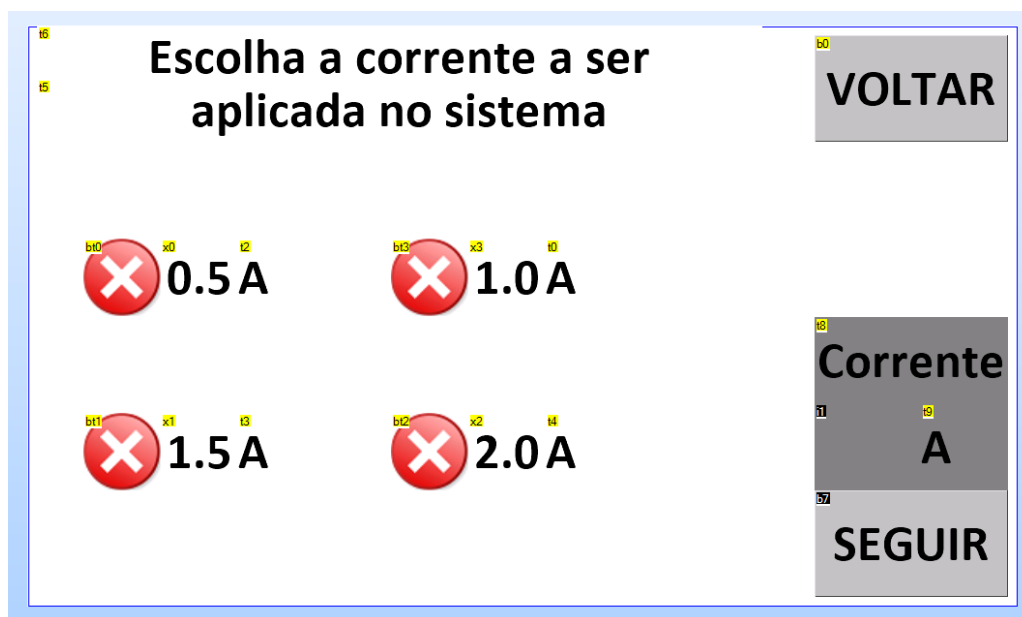


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página inicial do retificador. Aqui o modo de operação do sistema deve ser escolhido entre “Modo Automático” e “Modo Manual”. Após escolhido o modo de operação, basta apertar o botão “MENU”.

OBS: Nenhuma operação é executada ao apertar o botão “MENU” sem antes escolher um modo de operação do sistema.

Figura 30 – Página 4 (“MenuAutomatico”)

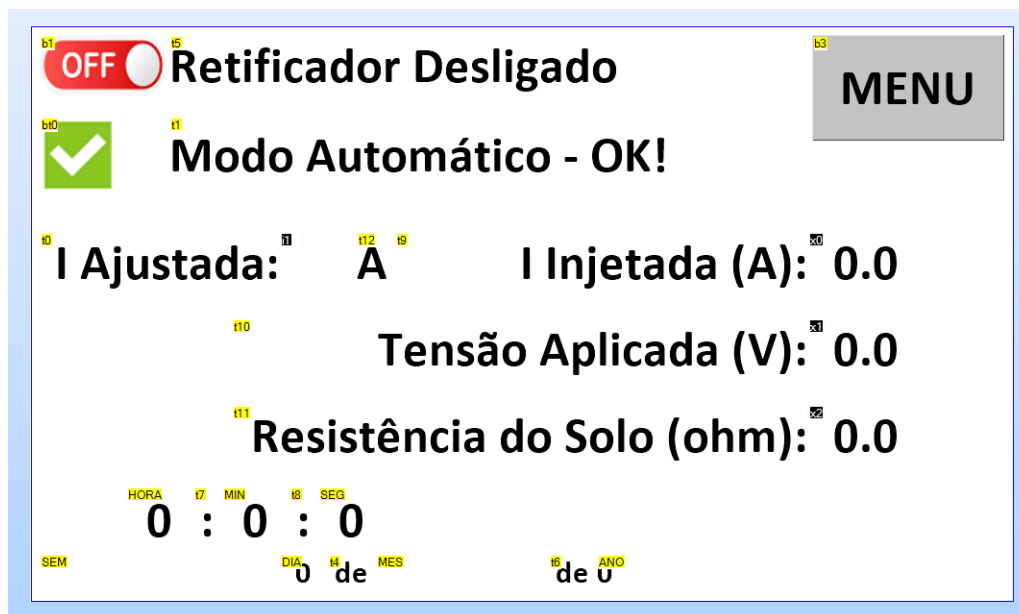


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página do “MENU” do “Modo Automático”. Aqui deve ser selecionada a corrente elétrica que foi dimensionada para proteção catódica do duto. Após escolhida a corrente, basta apertar o botão “SEGUIR”. Caso queira retornar à página inicial do retificador, basta apertar o botão “VOLTAR”.

OBS: Nenhuma operação é executada ao apertar o botão “SEGUIR” sem antes escolher uma opção de corrente elétrica a ser aplicada no sistema.

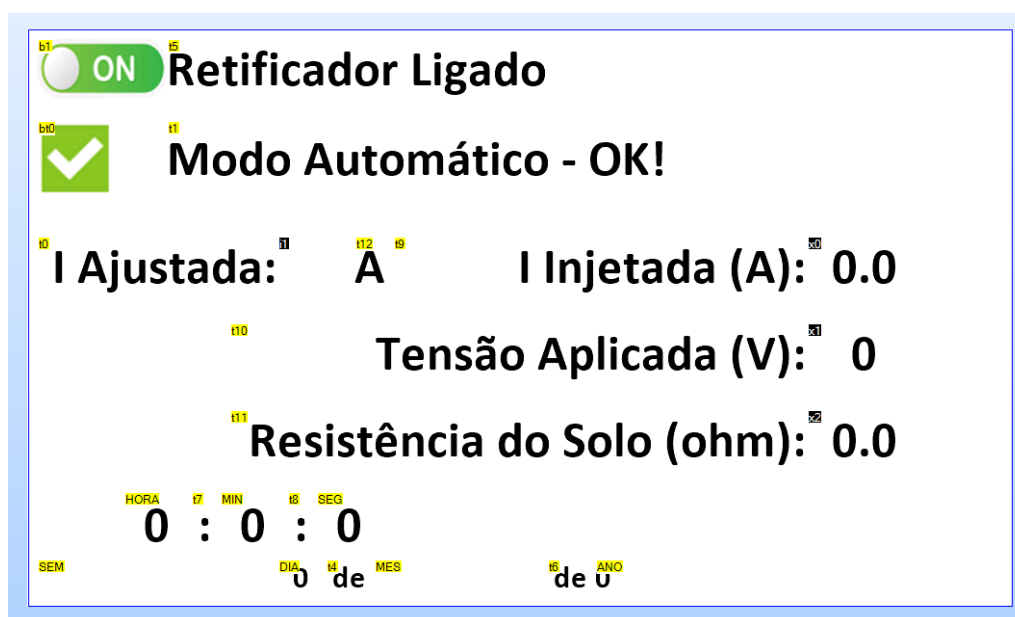
Figura 31 – Página 5 (“AjustadoAutom”)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de pré-operação do sistema em “Modo Automático”. O valor da corrente elétrica selecionada no MENU estará informado no campo “I Ajustada”. Os dados de hora e data são exibidos na parte inferior da tela. Após constatar que todos os dados estão corretos, basta apertar o botão “OFF” para colocar o retificador em operação. Caso queira retornar ao MENU do “Modo Automático”, basta apertar o botão “MENU”.

Figura 32 – Página 6 (“LigAutomatico”)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de operação do sistema em “Modo Automático”. O valor da corrente elétrica selecionada no MENU estará informado no campo “I Ajustada”. Os dados de hora e data são exibidos na parte inferior da tela. Os dados dos parâmetros relevantes do projeto serão exibidos em seus respectivos campos. Caso queira desligar o sistema, basta apertar o botão “ON”.

Figura 33 – Página 7 (“AjusteData”)

A interface de ajuste de hora e data apresenta o seguinte layout:

- Topo: Display digital mostrando "0 : 0 : 0" com labels "HORA", "MIN" e "SEC" acima dos respectivos dígitos.
- Segunda linha: Display digital mostrando "0 DIA DA SEMANA" com label "DIA" acima do primeiro dígito e "SEM" acima da palavra "DIA".
- Terceira linha: Display digital mostrando "0 de MÊS de 2022" com labels "DIA", "MÊS" e "ANO" acima dos respectivos dígitos.
- Quarta linha: Display digital mostrando "0 / 0 / 22" com labels "DIA", "MÊS" e "ANO" acima dos respectivos dígitos.
- Botões:
 - Botão "+" (b1) e botão "-" (b2) na base esquerda.
 - Botão "VOLTAR" (b3) no topo direito.
 - Botão "OK" (b4) no meio direito.
 - Botão "SEGUIR" (b5) na base direita.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de ajuste de hora e data. Ao contrário do que acontece no “Modo Automático” (em que o próprio Nextion informa a hora e a data de forma automática), foi definido que no “Modo Manual” o usuário seria o responsável por alimentar o sistema com esses dados. Dessa forma, foi desenvolvido uma interface simples, com poucos botões, de forma a facilitar a inserção desses dados. Para um incremento positivo nos valores, basta apertar o botão “+” e para um incremento negativo basta apertar o botão “-”. Ao se chegar no valor desejado, basta apertar o botão “OK” para que o programa passe automaticamente para o próximo item a ser ajustado. A sequência de valores a ser ajustada é a seguinte:

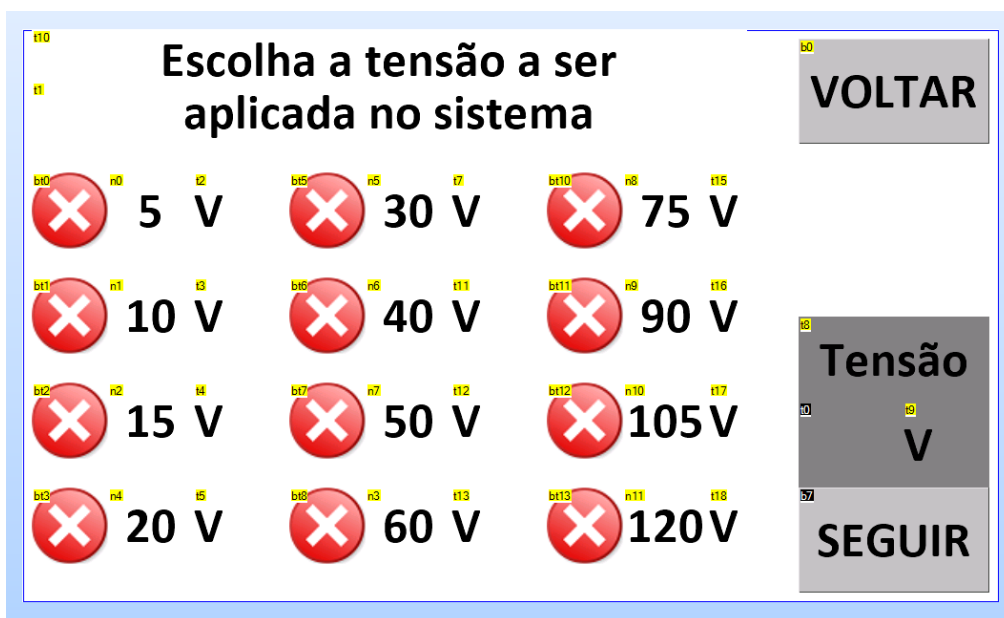
- Segundos;
- Minutos;
- Hora;

- Dia da semana;
- Dia;
- Mês; e
- Ano.

Concluído o ajuste de data e hora, basta apertar o botão “SEGUIR” para acessar o MENU do “Modo Manual”. Para voltar à página inicial do retificador basta apertar o botão “VOLTAR” a qualquer momento.

OBS: Nenhuma operação é executada ao apertar o botão “SEGUIR” sem antes terminar o ajuste de data e hora do sistema.

Figura 34 – Página 8 (MenuManual)

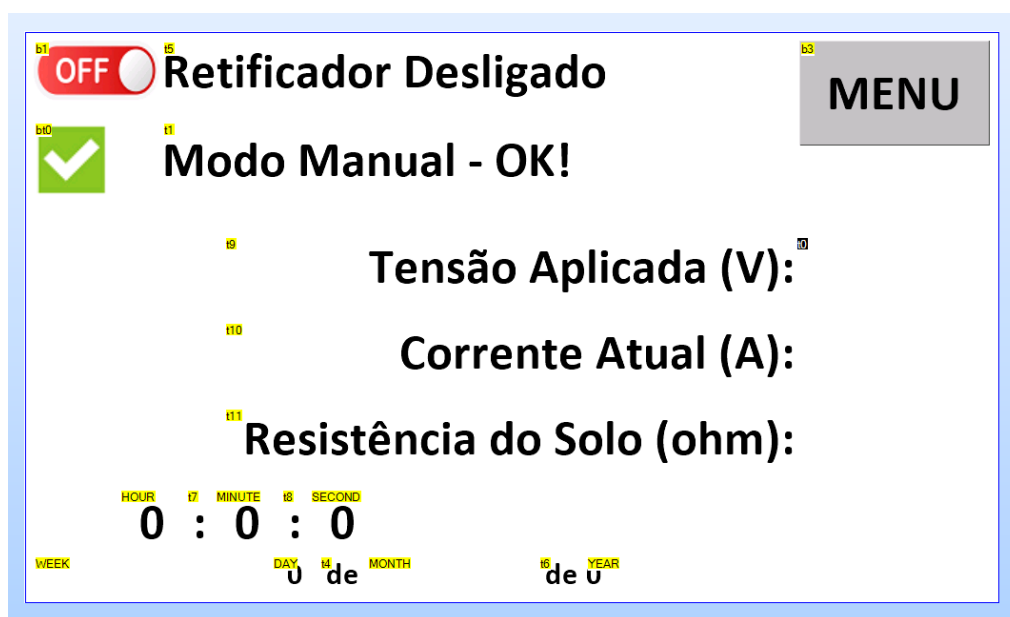


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página do “MENU” do “Modo Manual”. Aqui deve ser selecionada a tensão VDC que será aplicada de forma contínua pelo retificador. Após escolhida a tensão, basta apertar o botão “SEGUIR”. Caso queira retornar à página de ajuste de hora e data, basta apertar o botão “VOLTAR”.

OBS: Nenhuma operação é executada ao apertar o botão “SEGUIR” sem antes escolher uma opção tensão a ser aplicada no sistema.

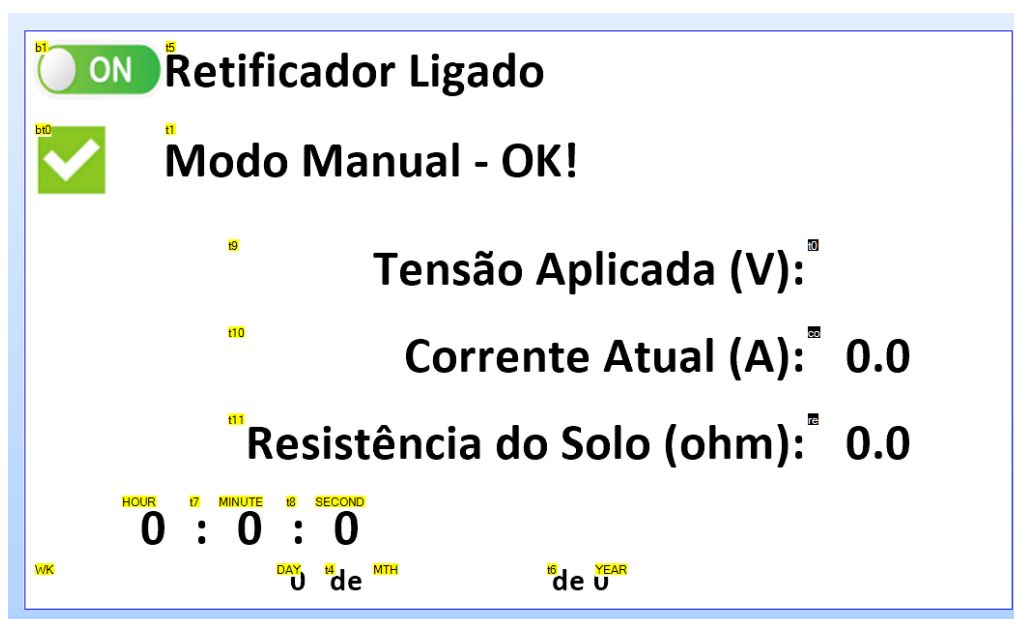
Figura 35 – Página 9 (AjustadoManual)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de pré-operação do sistema em “Modo Manual”. O valor da tensão elétrica selecionada no MENU estará informado no campo “Tensão Aplicada (V):”. Os dados de hora e data inseridos pelo usuário são exibidos na parte inferior da tela. Após constatar que todos os dados estão corretos, basta apertar o botão “OFF” para colocar o retificador em operação. Caso queira retornar ao MENU do “Modo Manual”, basta apertar o botão “MENU”.

Figura 36 – Página 10 (LigadoManual)



Elaborado pelo autor (2023)

Essa é a página de operação do sistema em “Modo Manual”. O valor da tensão VDC selecionada no MENU estará informado no campo “Tensão Aplicada (V):”. Os dados de hora e data são exibidos na parte inferior da tela. Os dados dos parâmetros relevantes do projeto serão exibidos em seus respectivos campos. Caso queira desligar o sistema, basta apertar o botão “ON”.