

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

MARCOS FREDERICO BORTOTTI

**Estudo de geração distribuída para redes elétricas
subterrâneas do tipo Spot Network – estudo de caso da
rede de Brasília**

São Paulo

2024

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

MARCOS FREDERICO BORTOTTI

**Estudo de geração distribuída para redes elétricas
subterrâneas do tipo Spot Network – estudo de caso da
rede de Brasília**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada a Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Engenharia Elétrica – Sistemas de
Potência

Orientador:

Prof. Dr. Jose Aquiles Baesso
Grimoni

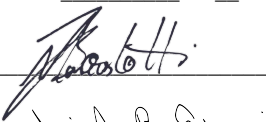
São Paulo

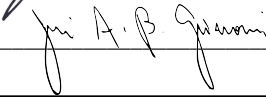
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _10_ de _Janeiro_ de _2024_

Assinatura do autor: 

Assinatura do orientador: 

Catálogo-na-publicação

Bortotti, Marcos Frederico

Estudo de geração distribuída para redes elétricas subterrâneas do tipo Spot Network – estudo de caso da rede de Brasília / M. F. Bortotti -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

150 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Eletricidade e Eletrônica 2.Distribuição de Energia Elétrica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BORTOTTI, M. F. Estudo de geração distribuída para redes elétricas subterrâneas do tipo Spot Network – estudo de caso da rede de Brasília. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023

Aprovado em: _____

Banca examinadora:

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento _____

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização deste trabalho de pesquisa e a conclusão da minha tese de mestrado. Sem o apoio e contribuição deles, este projeto não teria sido possível.

Primeiramente a minha família, especialmente aos meus pais Marcos Bortotti e Nívea Dorotéia de A. G. Bortotti, a minha companheira, Karina Barros e minha querida filha Maria Clara Barros Bortotti, quero agradecer o apoio incondicional e amor durante este período de estudos. A compreensão e incentivo foram a força motriz por trás da minha perseverança.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Jose Aquiles Baesso Grimoni, por sua orientação excepcional, dedicação e paciência ao longo deste processo. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e estou profundamente grato pela oportunidade de aprender com você.

Agradeço igualmente aos meus tios Douglas A. A. Garcia e Guilherme A. Garcia pelo exemplo e apoio ao longo de todos esses anos no meu percurso acadêmico em engenharia e pela importância que deram à continuação dos estudos.

Por fim, quero agradecer a todos os participantes deste projeto de pesquisa e desenvolvimento, amigos e pessoas que de alguma forma contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal ao longo dos anos. Todos vocês desempenharam um papel importante na minha jornada acadêmica e no desenvolvimento desta tese.

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditaram em mim e me apoiaram ao longo do caminho. Obrigado do fundo do meu coração.

Resumo

BORTOTTI, M. F. **Estudo de geração distribuída para redes elétricas subterrâneas do tipo Spot Network – estudo de caso da rede de Brasília**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023

Este estudo de mestrado se concentra no desenvolvimento de um protótipo de equipamento destinado à integração na Rede de Distribuição Subterrânea (RDS) da CEB/NDB, visando garantir o funcionamento eficiente da rede em face do aumento da Geração Distribuída (GD).

A RDS da CEB/NDB compreende três sistemas de distribuição: o sistema Spot, com transformadores em paralelo e ligações primárias independentes; o sistema Primário Seletivo, com redundância de alimentadores e comutação automática; e o sistema radial, sem redundância.

No contexto do sistema Spot Network, o projeto propôs um retrofit nas Estações Transformadoras (ET) para possibilitar sua operação eficaz com a presença da GD. Nas ETs, Protetores de Rede com relés de proteção de potência reversa são utilizados. No entanto, devido às configurações adotadas pela NDB, quantidades mínimas de GD podem desligar a proteção, resultando no isolamento dos consumidores, um fenômeno conhecido como "efeito de ilhamento" e proibido pelo IEEE 1547 e pela ABNT NBR62116.

O retrofit inclui a instalação de sensores de corrente nos ramos de baixa tensão da ET e um Concentrador de Geração Distribuída (C-GD). O C-GD monitora o nível de GD na ET e ajusta os relés dos Protetores de Rede por meio de algoritmos especializados, permitindo que a potência reversa flua da GD para a rede da NDB. Isso permite a coexistência harmoniosa entre GD e o sistema Spot Network, sem a necessidade de adaptações complexas na rede de distribuição que possam limitar a expansão da GD. Dessa forma, o projeto oferece uma solução prática para o desafio persistente da integração da GD, evitando obstáculos que poderiam restringir a adoção dessas importantes fontes de energia no sistema.

O estudo representa um avanço significativo na resolução de um dilema persistente na integração da GD, contribuindo para um sistema de distribuição mais eficiente e sustentável.

Palavras-chave: Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Geração Distribuída (GD). Rede de Distribuição Subterrânea (RDS). Retrofit. Rede Spot. Protetores de Rede. Proteção de Potência Reversa. Concentrador de Geração Distribuída (C-GD). Rede Redundante. Ilhamento. Coexistência Harmoniosa. Usinas Fotovoltaicas. Rede de Distribuição. Normativa IEEE 1547. Injeção de Energia. Reticulado Generalizado. Reticulado Exclusivo

Abstract

BORTOTTI, M. F. Distributed Generation Study for Underground Spot Network Electrical Grids - Brasília Network Case Study.

Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023

This master's study focuses on the development of a prototype equipment aimed at integration into the Underground Distribution Network (UDN) of CEB/NDB, with the goal of ensuring the efficient operation of the network in the face of the increasing Distributed Generation (DG).

CEB/NDB's UDN comprises three distribution systems: the Spot system, with parallel transformers and independent primary connections; the Selective Primary system, with feeder redundancy and automatic switching; and the radial system, lacking redundancy.

In the context of the Spot Network system, the project proposed a retrofit in Transformer Stations (TS) to enable their effective operation in the presence of DG. TSs house Network Protectors with reverse power protection relays. However, due to the configurations adopted by NDB, even small amounts of DG can trip the protection, resulting in the isolation of consumers, a phenomenon known as "islanding effect," and prohibited by IEEE 1547 and by ABNT NBR 62116.

The retrofit includes the installation of current sensors in the low-voltage output branches of the TS and a Distributed Generation Concentrator (C-GD). The C-GD monitors the level of DG in the TS and adjusts the relays of the Network Protectors through specialized algorithms, allowing reverse power to flow from DG to the NDB network. This enables the harmonious coexistence between DG and the Spot Network system without the need for complex adaptations to the distribution network that could limit the expansion of DG. Thus, the project provides a practical solution to the persistent challenge of DG integration, avoiding obstacles that could restrict the adoption of this important energy source in the system.

The study represents a significant advancement in addressing a persistent dilemma in DG integration, contributing to a more efficient and sustainable distribution system.

Keywords: Research and Development (R&D). Distributed Generation (DG). Underground Distribution Network (RDS). Retrofit. Spot Network.

Network Protectors. Reverse Power Protection. Concentrator of Distributed Generation (C-GD). Redundant Network. Islanding. Harmonious Coexistence. Photovoltaic Power Plants. Distribution Network. IEEE 1547 Standard. Energy Injection. Grid Network

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DOIS SISTEMAS DO TIPO SPOT NETWORK, COM 2 TRANSFORMADORES CADA ET.	32
FIGURA 2 – ET DO TIPO SPOT NETWORK TÍPICA, COM 3 TRANSFORMADORES	33
FIGURA 3 - DESAFIOS DA MODERNIZAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	37
FIGURA 4 – RELAÇÃO ENTRE OS TERMOS DE INTERCONEXÃO DESCRITOS NA NORMA IEEE 1547.	44
FIGURA 5 – INTERLIGAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA O SETUP DE TESTES.....	56
FIGURA 6 – MONTAGEM DA BANCADA DE TESTES PARA EMULAÇÃO DE FALHAS NA REDE SPOT	57
FIGURA 7 – CONFIGURAÇÃO PARA FECHAMENTO DOS RELÉS NETPRO.	58
FIGURA 8 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO REDE COM RELAÇÃO AO LADO TRAFÓ (SEIS TENSÕES DISPONÍVEIS PARA O RELÉ QUANDO O PROTETOR ESTÁ ABERTO).	58
FIGURA 9 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÕES DE REDE E CORRENTES TRIFÁSICAS.	59
FIGURA 10 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO TRAFÓ	59
FIGURA 11 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÃO REDE E CORRENTE.....	59
FIGURA 12 – SETUP DO INÍCIO DO DECREMENTO DA CORRENTE	60
FIGURA 13 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO REDE	61
FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÃO REDE E CORRENTE.....	62
FIGURA 15 – CONFIGURAÇÃO DO INÍCIO DA POTÊNCIA REVERSA	62
FIGURA 16 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO REDE	63
FIGURA 17 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÃO REDE E CORRENTE.....	64
FIGURA 18 – CONFIGURAÇÃO DO DECREMENTO DA POTÊNCIA REVERSA	64
FIGURA 19 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO REDE	65
FIGURA 20 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÃO REDE E CORRENTE.....	65
FIGURA 21 – CONFIGURAÇÃO DO INCREMENTO DA POTÊNCIA FORNECIDA AO CLIENTE.....	66
FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO REDE	66
FIGURA 23 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÃO REDE E CORRENTE.....	67
FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DA POTÊNCIA FORNECIDA AO CLIENTE	67
FIGURA 25 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA DEFASAGEM LADO REDE	68
FIGURA 26 – CONFIGURAÇÃO DO CE-7012 PARA TENSÃO REDE E CORRENTE.....	68
FIGURA 27 – GRÁFICO DA TENSÃO DE REDE DA FASE A INJETADA NOS RELÉS – 1ª SIMULAÇÃO	69
FIGURA 28 – GRÁFICO DA INSERÇÃO DE CORRENTE DA FASE A INJETADA NOS RELÉS – 1ª SIMULAÇÃO	70
FIGURA 29 – MONITORAMENTO DOS RELÉS PELO SISTEMA SCADA – 1ª SIMULAÇÃO.....	71
FIGURA 30 – MONITORAMENTO DOS RELÉS PELO SISTEMA SCADA – 2ª. SIMULAÇÃO.....	73
FIGURA 31 – GRÁFICO DA TENSÃO DE REDE DA FASE A INJETADA NOS RELÉS – 3ª. SIMULAÇÃO	75

FIGURA 32 – GRÁFICO DA INSERÇÃO DE CORRENTE DA FASE A INJETADA NOS RELÉS (CONSIDERAR QUE O IHM DO RELÉ APRESENTA UMA CORRENTE PROPORCIONAL À PRESENÇA DE UM TC DE 400:1).....	75
FIGURA 33 – MONITORAMENTO DO ESTADO ON-OFF (CLOSE – TRIP) DOS RELÉS PELO SISTEMA SCADA – 3ª. SIMULAÇÃO.....	77
FIGURA 34 – INICIALIZAÇÃO: TENSÕES DE TRANSFORMADOR E DE REDE GERADOS PELO TESTADOR CE-7012: T = 20 S.....	78
FIGURA 35 – FECHAMENTO DO PROTETOR_01 E PROTETOR_02: CORRENTE DE CARGA DOS CONSUMIDORES DA REDE DA CONCESSIONÁRIA NA ORDEM DE 800 A TRIFÁSICO (APROX. 400A EM CADA UM DOS DOIS PROTETORES DE REDES), CORRENTES NO DISPLAY DOS RELÉS CONSIDERANDO-SE TC DE 400:1 INJETADAS DIRETAMENTE NOS RELÉS 01 E 02 PELO TESTADOR CE-7012: T = 23 S.....	79
FIGURA 36 – EFEITO DO AUMENTO DA CORRENTE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - IGA, MANTENDO-SE A CARGA DOS CONSUMIDORES CONSTANTE EM ~800A, SENDO VERIFICADA COMO DECRÉSCIMO DA CORRENTE TRIFÁSICA FORNECIDA PELOS TRANSFORMADORES DA REDE DA CONCESSIONÁRIA - IRC, ATRAVÉS DOS PROTETORES 01 E 02, EM 3 MOMENTOS DISTINTOS NA SIMULAÇÃO.....	79
FIGURA 37 – EFEITO DO AUMENTO CONTÍNUO DA CORRENTE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - IGA, MANTENDO-SE A CARGA DOS CONSUMIDORES CONSTANTE EM ~800A, EM 3 MOMENTOS DISTINTOS NA EMULAÇÃO EM QUE A POTÊNCIA DA GD ULTRAPASSA O CONSUMO, PROVOCANDO RETORNO DE POTÊNCIA PARA A REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCESSIONÁRIA.....	80
FIGURA 38 – MOMENTO NO QUAL É EMULADA UMA FALHA NO PRIMÁRIO DO ALIMENTADOR DO PROTETOR_02 QUE PROVOCOU UMA CORRENTE REVERSA MAIOR QUE OS 15A DO SETUP DO RELÉ, MANTIDA E SEM INTERRUPTÃO DE UMA GD DE 400A TRIFÁSICA.....	81
FIGURA 39 – SEQUENCIA PÓS TRIP, NO QUAL O RELÉ DO PROTETOR_02 MANTÉM O MESMO NA CONDIÇÃO ABERTO, EM QUE A GD COMEÇA A DIMINUIR CONFORME AJUSTES DA SIMULAÇÃO - AINDA EM POTÊNCIA REVERSA.....	82
FIGURA 40 – SEQUENCIA PÓS TRIP NO QUAL O RELÉ DO PROTETOR_02 MANTÉM O MESMO NA CONDIÇÃO ABERTO, E QUE A GD CONTINUA A DIMINUIR CONFORME PROGRAMADO NA SIMULAÇÃO COM CONSEQUENTE COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA INJETADA PELA CONCESSIONÁRIA.....	82
FIGURA 41 – MOMENTO FINAL DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO, MANTIDA A CARGA CONSTANTE DO CLIENTE EM 800A TRIFÁSICO, SEM A INJEÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA REDE DA CONCESSIONÁRIA E SEM O RETORNO DA TENSÃO NO ALIMENTADOR PRIMÁRIO NO. 2: T = 1:19 S.....	83
FIGURA 42 – COMPORTAMENTO DAS CORRENTES TRIFÁSICAS EQUILIBRADAS DAS DUAS REDES DA CONCESSIONÁRIA (IRC) NO SISTEMA SPOT NETWORK DE DOIS TRANSFORMADORES, FRENTE À INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (IGD) E COM CARGA (ICARGA) CONSTANTE DE 800 A.....	84
FIGURA 43 – QUADRO DE BAIXA TENSÃO CBT, COMPOSTO POR 8 RÉGUAS DE FUSÍVEIS NH-2 / 400A, CUJO TC PRONUTEC PODE SER INSERIDO COMO ACESSÓRIO PARA MEDIDAS DE GRANDEZAS ELÉTRICAS E COMUNICAÇÃO RS-485: A) CBT; B) RÉGUA NH-2 TRIPOLAR; C) TC PRONUTEC.....	89
FIGURA 44 – FONTE DE ALIMENTAÇÃO COM DUPLA ALIMENTAÇÃO, COM REPETIDOR 485 EMBUTIDO, A SER UTILIZADA NO PROJETO COMO REPETIDOR/AMPLIFICADOR DO SINAL 485: A) VISTA INTERNA; B) COM CASE DE INSTALAÇÃO.....	90
FIGURA 45 – RELÉ DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES, QUE ATUA EM MODO DE SETUP DINÂMICO DE PROTEÇÃO, PARA DISTINÇÃO DE GD E FALHA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	90

FIGURA 46 – FOTOLITO DA PLACA MICRO PROCESSADA MODELO V-80H	92
FIGURA 47 – PLACA PCB MODELO V-80H, MONTADA COM COMPONENTES	92
FIGURA 48 – PLACA PCB MODELO V-80H, MONTADA COM COMPONENTES	93
FIGURA 49 – DISPLAY LCM COLORIDO 7” UTILIZADO PARA INTERFACE DE PROGRAMAÇÃO E MONITORAMENTO DENTRO DAS ETS DA CONCESSIONÁRIA.....	93
FIGURA 50 – ESTRUTURA PARA FIXAÇÃO DA PLACA ELETRÔNICA MICRO PROCESSADA V80H: A) DESENHO PARA FABRICAÇÃO; B) PEÇA MANUFATURADA E MONTAGEM FINAL NO PROTETOR DE REDES	94
FIGURA 51 – TELAS DE IHM: A) PROPOSTA DE EMULAÇÃO DA IHM EXISTENTE; B) IHM EXISTENTE	96
FIGURA 52 – TELA DO C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: TELA DE INICIALIZAÇÃO.....	96
FIGURA 53 – TELA DO C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: TELA DE TENSÕES DE TRANSFORMADOR E DE REDE (PROTETOR DE REDES ABERTO).....	96
FIGURA 54 – C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: TELA DE DATA E HORA.....	97
FIGURA 55 – C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: TELA DE ENTRADA DE AJUSTES DE SETUP DO RELÉ	97
FIGURA 56 – TELA DO C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: TELA DE ENTRADA DE AJUSTES DE SETUP DO RELÉ – INDICAÇÃO DA CORRENTE NOMINAL DO TRANSFORMADOR DO SPOT.....	98
FIGURA 57 – TELA DO C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: TELA DE ENTRADA DE AJUSTES DE SETUP DO RELÉ – AJUSTE DE TRIP DA CORRENTE INSTANTÂNEA EM POTÊNCIA REVERSA.....	98
FIGURA 58 – TELA DO C-GD (PLACA V80H + DISPLAY 7”) EMULANDO TELA DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO PROTETOR DE REDES: DISPLAY COM CORRENTES TRIFÁSICAS DO RESPECTIVO TRANSFORMADOR AO QUAL O PROTETOR DE REDES ESTÁ ACOPLADO - PROTETOR DE REDES FECHADO	98
FIGURA 59 – TELAS DO MENU INICIO DO C-GD: TENSÕES, CORRENTES, TEMPERATURAS, DIGITAIS E STATUS DO PROTETOR DE REDES (A: FECHADO; B: ABERTO).....	99
FIGURA 60 – TELAS DO MENU PROTETOR: EMULA AS FUNÇÕES DO RELÉ ATUAL DO PROTETOR DE REDES	99
FIGURA 61 – TELAS DO MENU RAMAIS BT: APRESENTA POTENCIA E FATOR DE POTÊNCIA E FLUXO DE POTÊNCIA POR CÓDIGO DE COR (VERDE: FLUXO DIRETO AO CONSUMIDOR; VERMELHO: FLUXO REVERSO DO CONSUMIDOR “GD”)	100
FIGURA 62 – TELAS DO MENU I/O: APRESENTA STATUS DAS 8 ENTRADAS E 8 SAÍDAS DIGITAIS PRESENTES NO HARDWARE DO C-GD (DISPONÍVEIS PARA VÁRIAS APLICAÇÕES POR PARTE DA CONCESSIONÁRIA).....	100
FIGURA 63 – TREM DE PULSOS DE COMUNICAÇÃO ENTRE C-GD E TCS DA REDE 485 E AVALIAÇÃO DO TEMPO DE POOLING	101
FIGURA 64 – DIAGRAMA DE LIGAÇÃO DO CONTROLADOR DE GD DE REDE SPOT: AÇÃO LOCAL NA ET NA LEITURA DOS TCS, CÁLCULO CONTÍNUO DA GD, AJUSTE DINÂMICO DO RELÉ DO PROTETOR E INTERAÇÃO COM IHM LOCAL	102
FIGURA 65 – ALGORITMO BÁSICO DO FIRMWARE DO C-GD PARA SISTEMA SPOT NETWORK IMPLANTADO NA PLACA V80H PARTE 1.....	1023

FIGURA 66 – ALGORITMO BÁSICO DO FIRMWARE DO C-GD PARA SISTEMA SPOT NETWORK IMPLANTADO NA PLACA V80H PARTE 2.....	1024
FIGURA 67 – ESTRUTURA DE COMUNICAÇÃO LOCAL NA ET SPOT NETWORK.....	105
FIGURA 68 – CONTROLADOR DE GD (C-GD) INSTALADO NO LOCAL DO IHM DO PROTETOR DE REDES, CONECTADO AO RELÉ DE PROTEÇÃO POR COMUNICAÇÃO SERIAL RS232.....	111
FIGURA 69 – DISPLAY DO C-GD EMULANDO A IHM DO PROTETOR DE REDES, COM POTÊNCIA DIRETA (2400 W)	114
FIGURA 70 – DISPLAY DO C-GD EMULANDO A IHM DO PROTETOR DE REDES, COM POTÊNCIA REVERSA (TRIP POR POTÊNCIA REVERSA TEMPORIZADA OCORREU A SEGUIR).....	114
FIGURA 71 – DIAGRAMA UNIFILAR DA ET DO SPOT NETWORK MONTADA NA ÁREA PILOTO, MOSTRANDO O CBT COMO NÓ KIRCHOFF ENTRE FONTE (PROTETORES 1 E 2 E RESPECTIVOS TRANSFORMADORES) E GD/CARGAS (8 SAÍDAS INDICADAS NO DIAGRAMA).....	116
FIGURA 72 – CARGAS (LÂMPADAS DE DESCARGA DE 400W), FONTE GD (UFV) CONECTADOS AO CBT, RETROFITADO COM SMART TC; ELEMENTOS INSTALADOS NA ÁREA PILOTO PARA TESTES FINAIS DO PROJETO DE PESQUISA	117
FIGURA 73 – CURVA DE CARGA NO PROTETOR DE REDES DA ÁREA PILOTO ENTRE 10H E 11H DO DIA 17/02/2022, DEMONSTRANDO FUNCIONAMENTO EM POTÊNCIA REVERSA NA PRESENÇA DE GD	119
FIGURA 74 – REGISTROS DE A) TENSÃO DE REDE E B) VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO PROTETOR DE REDES DA ÁREA PILOTO ENTRE 10H E 11H DO DIA 17/02/2022	120
FIGURA 75 – IMAGEM DO SISTEMA SUPERVISÓRIO BLUEPLANT COM REGISTRO DE DADOS DA ÁREA PILOTO, DIA 17/02/2022 ÀS 11H10M.....	121
FIGURA 76 – AJUSTES DE CORRENTE REVERSA TEMPORIZADA (-1,5 A) E INSTANTÂNEA (-2 A) PARA OS TESTES COM TRANSITÓRIOS DE CARGA E GD	126
FIGURA 77 – CORRENTE COM POTÊNCIA POSITIVA TRANSITANDO PELO PROTETOR DE REDES AO LIGARMOS TODAS AS CARGAS E A UFV AO MESMO TEMPO	126
FIGURA 78 – DIAGRAMA UNIFILAR DE MANIPULAÇÃO DE CARGAS NOS TESTES DE FUNCIONAMENTO DO C-GD NA PRESENÇA DE GD E CARGAS.....	127
FIGURA 79 – OSCILOGRAFIAS DAS CORRENTES DA UFV E DAS LÂMPADAS DE DESCARGA VAPOR METÁLICO.....	128
FIGURA 80 – OSCIOGRAMA DE REGISTRO INICIAL, COM UFV E TODAS AS CARGAS LIGADAS	129
FIGURA 81 – OSCIOGRAMA DE TRANSITÓRIO COM A RETIRADA DA UFV.....	129
FIGURA 82 – OSCIOGRAMA DE TRANSITÓRIO INSERINDO-SE CARGA (I)	130
FIGURA 83 – OSCIOGRAMA DE TRANSITÓRIO INSERINDO-SE CARGA (II).....	131
FIGURA 84 – OSCIOGRAMA DE TRANSITÓRIO RETIRANDO-SE CARGA.....	131
FIGURA 85 – SEQUÊNCIA DE OSCIOGRAMAS DE TRANSITÓRIO RETIRANDO-SE CARGA E VERIFICANDO-SE A ALTERAÇÃO DA CARGA PASSANTE PELO PROTETOR DE REDES ATÉ ADENTRAR A ZONA DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO INSTANTÂNEA DO RELÉ, MAS SEM TRIP DEVIDO AO FATO DA ORIGEM DA POTÊNCIA REVERSA SER DE GD.....	132

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EFEITO DA INSERÇÃO DA GD FOTOVOLTAICA EM REDE SECUNDÁRIA RETICULADA, PELA VARIAÇÃO DA POTÊNCIA.....	36
TABELA 2 - CONSIDERAÇÕES A SEREM ESTUDADAS PELO LADO DA CONCESSIONÁRIA PARA PERMISSÃO, NEGAÇÃO OU RESTRIÇÃO DE INSTALAÇÃO DE GD EM SISTEMA SPOT NETWORK.	48
TABELA 3 - TEMPOS DAS OPERAÇÕES DOS RELES NETPRO UTILIZADOS NA 1ª. SIMULAÇÃO.....	72
TABELA 4 - TEMPOS DAS OPERAÇÕES DOS RELES NETPRO UTILIZADOS NA 2ª. SIMULAÇÃO	74
TABELA 5 - TEMPOS DAS OPERAÇÕES DOS RELES NETPRO UTILIZADOS NA 3ª. SIMULAÇÃO	77
TABELA 6 – ENSAIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DESENVOLVIDO NA CONDIÇÃO DE NÃO RECONHECIMENTO DE GD.	113
TABELA 7 – DADOS DISPONÍVEIS NO SUPERVISÓRIO BLUEPLANT REFERENTE A REGISTROS DO PROTETOR DE REDES NO. 2, DAS 10H00M22S ÀS 11H00M18S DO DIA 17/02/2022	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
BT	Baixa Tensão
CBT	Quadro de Baixa Tensão
CEB-D	Compania Energética de Brasília - Distribuição
C-GD	Concentrador de Geração Distribuída
CNB	Neoenergia Distribuição Brasília
DER	Distributed Energy Resources
EPS	Electric Power System
ET	Estações Transformadoras
GD	Geração Distribuída
IED	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IGD	Inserção de Geração Distribuída
IHM	Interface Homem Máquina
IL	Corrente de Carga de Teste
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PCC	Ponto de Acoplamento Comum
RDS	Rede de Distribuição Subterrânea
TC	Transformador de Corrente
TDD	Distorção de Demanda Total
TRD	Distorção Total de Corrente Nominal
UFV	Unidade Fotovoltaica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. JUSTIFICATIVAS	23
1.2. OBJETIVOS GERAIS	24
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.4. METODOLOGIA	26
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1.1. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO RETICULADO GRID	31
2.1.2. SISTEMA SPOT NETWORK DE DISTRIBUIÇÃO EM REDE	31
2.1.3. INTERCONEXÃO DE GD COM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	34
2.1.4. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS E REQUISITOS DE INTERCONEXÃO DE GD	41
2.1.4.1. DEFINIÇÕES DA NORMA IEEE STD 1547	41
2.1.4.2. CONSIDERAÇÕES ACERCA DOS PONTOS DE INTERSECÇÃO DE GD NA REDE	43
2.1.4.3. REDES DE PONTOS SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO SPOT E GRID	45
2.1.4.4. PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES DE REDE. NORMATIVA IEEE	46
2.1.4.5. PROTEÇÃO DE REDES SPOT NETWORK	47
3. PROPOSTA	52
4. ESTUDO DE CASO	55
4.1. CONFIGURAÇÃO DO TESTADOR COMPACTO CE-7012	58
4.2. PRIMEIRA SIMULAÇÃO: INSERÇÃO GD SEM LIMITAÇÃO DE POTÊNCIA PELA CONCESSIONÁRIA	69
4.3. SEGUNDA SIMULAÇÃO: INSERÇÃO GD COM RELÉ AUTO AJUSTADO DESCONSIDERANDO A GD PARA TRIP 72	
4.4. TERCEIRA SIMULAÇÃO: FALHA NA REDE PRIMÁRIA DURANTE GERAÇÃO DISTRIBUIDA PARA ACIONAMENTO DA PROTEÇÃO CONVENCIONAL	75
5. DESCRIÇÃO DE DESENVOLVIMENTO DO C-GD	87
5.1. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE RETOFIT PROPOSTO	87
5.2. TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM COMUNICAÇÃO PARA OS PAINÉIS DE DISTRIBUIÇÃO	89
5.3. FONTE REPETIDORA DE SINAL DIGITAL 485 COM REDUNDÂNCIA	89
5.4. RELÉ DE PROTEÇÃO PARA PROTETORES DE REDE	90
5.5. CONTROLADOR DE GD DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DO TIPO RETICULADO DEDICADO (SPOT NETWORK)	91
5.6. FIRMWARE DA PLACA V80H	94
5.6.1 FIRMWARE DA PLACA V80H – EMULAÇÃO DA IHM EXISTENTE	95
5.6.2 FIRMWARE DA PLACA V80H – ESTABELECIAMENTO DO NÍVEL DE GD DA ET	100
FIGURA 65 – ALGORITMO BÁSICO DO FIRMWARE DO C-GD PARA SISTEMA SPOT NETWORK IMPLANTADO NA PLACA V80H.	103
5.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESTRUTURA DE HARDWARE, SOFTWARE E FIRMWARE DESENVOLVIDA/IMPLANTADA	105
6. TESTES DA METODOLOGIA, PLATAFORMA COMPUTACIONAL E/OU PROTÓTIPOS DE EQUIPAMENTOS	108
6.1. DESCRIÇÃO DO PACOTE TECNOLÓGICO DESENVOLVIDO	108
6.2. TESTES SELECIONADOS PARA AVALIAÇÃO DA FUNCIONALIDADE DO SISTEMA DESENVOLVIDO	110
6.2.1. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DESENVOLVIDO NA CONDIÇÃO DE NÃO RECONHECIMENTO DE GD	111
6.2.2. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DESENVOLVIDO NA CONDIÇÃO DE RECONHECIMENTO DE GD	115
6.2.2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO: EQUAÇÃO GERAL DO NÓ KIRCHOFF “CBT”:	115
6.2.2.2. TESTES OPERACIONAIS DE FUNCIONAMENTO DO C-GD NO SISTEMA DESENVOLVIDO NA CONDIÇÃO DE RECONHECIMENTO DE GD	118
6.2.3. CONCLUSÕES ACERCA DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DESENVOLVIDO – OPERAÇÃO DO C-GD EM CONJUNTO COM O RELÉ DE PROTEÇÃO DO PROTETOR DE REDES	133

7. RESULTADOS DO PROJETO.....	135
7.1. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO PRODUTO PRINCIPAL	135
7.2. CRITÉRIOS DE ORIGINALIDADE	136
7.2.1. ORIGINALIDADE DO PRODUTO PRINCIPAL	136
7.2.2. ORIGINALIDADE DAS TÉCNICAS EMPREGADAS.....	138
7.3. CRITÉRIO DE APLICABILIDADE.....	140
7.3.1. ÂMBITO DA APLICAÇÃO	140
7.3.2. ABRANGÊNCIA DA APLICAÇÃO.....	141
7.3.3. RESTRIÇÕES DE APLICAÇÃO	141
7.3.4. TESTES DE FUNCIONALIDADES	142
8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148

1. INTRODUÇÃO

A cidade de Brasília, marco de modernidade e desenvolvimento como a capital do Brasil desde 1960, requer uma infraestrutura elétrica sólida para acompanhar seu contínuo crescimento e progresso. As redes elétricas de distribuição desempenham um papel crucial nesse contexto, garantindo o fornecimento contínuo de energia para atender às demandas crescentes de uma cidade em expansão.

No entanto, o cenário energético evoluiu ao longo dos anos, impulsionando a adoção de tecnologias mais sustentáveis, como a geração distribuída (GD). Especificamente, a cidade de Brasília tem visto um aumento significativo na expansão das fontes de GD, que se integram diretamente ao sistema elétrico por meio da rede de distribuição de baixa tensão reticulada, conhecida como Spot Network[1] ou Reticulado Exclusivo.

A convivência harmoniosa entre as tecnologias de geração distribuída e as redes de distribuição subterrâneas do tipo Spot Network tem sido um desafio histórico, resultando em desarmes indevidos de proteção e isolamento dos consumidores da rede da concessionária Neoenergia Distribuição Brasília (NDB). Essa exclusão das tecnologias reticulada e GD on grid tem gerado situações temporárias e indesejadas, exigindo a busca por soluções práticas e eficazes para permitir sua convivência[2].

Assim, o presente projeto de pesquisa tem como objetivo primordial harmonizar a Rede de Distribuição Subterrânea (RDS) da NDB com as fontes de geração distribuída em expansão. Almejamos encontrar soluções tecnológicas que possibilitem a convivência harmoniosa entre a rede de distribuição do tipo Spot Network e as fontes de GD, sem a necessidade de grandes rearranjos de engenharia.

Compreender os requisitos tecnológicos necessários para a implantação da GD na RDS da NDB, equiparando-os aos requisitos aplicados nos sistemas radiais tradicionais, é fundamental para assegurar a coexistência eficiente das tecnologias do ponto de vista dos consumidores. Adicionalmente, é imperativo que a NDB adote

equipamentos em suas redes de distribuição que facilitem a integração entre a tecnologia Spot e a GD, sem restrições quanto à potência instalada e à interrupção da geração.

O sucesso dessa integração entre a RDS e a GD traz consigo diversos benefícios, incluindo a redução das intercorrências com os consumidores e a conformidade com as exigências tecnológicas impostas pela GD. Este projeto de pesquisa assume uma posição relevante para o avanço da tecnologia e eficiência energética em Brasília, buscando aprimorar a operação em harmonia entre a RDS da NDB e a expansão das fontes de geração distribuída na forma de um sistema Spot Network.

Por meio de uma análise abrangente das interações entre essas tecnologias, esperamos contribuir para o avanço do conhecimento científico na área de geração distribuída e redes elétricas subterrâneas, fornecendo insights para a tomada de decisões e a implementação de políticas públicas mais efetivas rumo a um futuro energético sustentável e resiliente para a cidade de Brasília.

1.1. Justificativas

A convivência harmoniosa entre a tecnologia de rede de distribuição Spot Network e a geração distribuída (GD) on grid tem sido objeto de preocupação tanto para as concessionárias quanto para os organismos normatizadores. A literatura tem apontado que a abordagem comumente adotada para evitar intercorrências nesse cenário é limitar a potência instalada de GD a uma ordem de grandeza da potência nominal das Estações Transformadoras (ETs). Além disso, outra alternativa é impor aos consumidores/geradores a instalação de sistemas de monitoramento de supressão de retorno de energia à rede da concessionária, o que acarreta custos adicionais aos projetos de GD. Para pequenos consumidores, essa imposição torna a GD economicamente inviável, gerando insatisfação entre os consumidores/geradores.

Considerando a crescente busca por vantagens econômicas e contribuições para uma matriz energética mais sustentável, a possibilidade de instalar suas próprias GD tem sido ansiada por muitos

consumidores/geradores, tornando a questão de convivência entre a tecnologia Spot Network e GD on grid ainda mais relevante.

Dessa forma, a motivação subjacente ao desenvolvimento deste projeto de pesquisa foi proporcionar uma abordagem eficaz, a ser adotada pelas concessionárias, para lidar com a integração da GD em redes de distribuição subterrâneas. O enfoque visa superar os desafios impostos pelas diferenças tecnológicas entre a rede de distribuição Spot Network, conhecida por seus excelentes índices de qualidade de energia, e a GD on grid, caracterizada por estar permanentemente conectada à rede da concessionária, com a possibilidade de retorno de energia não consumida.

O objetivo é encontrar soluções que permitam a convivência das tecnologias de maneira eficiente e segura, considerando a capacidade de instalação de GD em uma ordem adequada de grandeza em relação às ETs e a viabilidade econômica para os consumidores/geradores. Com tais avanços, espera-se atender às expectativas dos consumidores e promover o uso mais amplo da GD como uma opção sustentável e vantajosa para a matriz energética. Ao enfrentar esses desafios, o estudo contribuirá para o avanço das tecnologias de geração distribuída e para a melhoria geral do sistema elétrico em redes subterrâneas, com impactos positivos em direção a um futuro mais sustentável e eficiente para a cidade de Brasília.

1.2. Objetivos Gerais

O projeto de pesquisa tem como objetivo geral projetar e testar uma ferramenta eficaz no auxílio das equipes de operação e manutenção da concessionária, que permita o mapeamento da demanda, a quantificação de áreas mais ou menos carregadas com GD através da medição "on-line" de dados e a solução de problemas presentes na RDS devido à GD. Para tanto, será necessário:

- a) Projetar, e especificar equipamentos novos, não utilizados na rede de distribuição subterrânea, capazes de atenderem aos objetivos do projeto;
- b) Solucionar a problemática do desarme da proteção dos protetores de rede na presença de exportação de GD;

- c) Permitir que a concessionária tenha, com antecedência, dados suficientes quanto a situações críticas para ações proativas de intervenção diminuindo o número e tempo de paradas não programadas.

A área de influência de um sistema de Geração Distribuída, devido ao seu crescimento, pode e certamente o vai influenciar todo o carregamento da rede de distribuição e necessita de um novo *approach*.

1.3. Objetivos Específicos

Os novos equipamentos propostos se constituem em um modelo de retrofit para as Estações Transformadoras da RDS, de modo a permitirem atingir os objetivos. A função de transferência automática das chaves primárias e a de protetor de redes do reticulado terão suas funções preservadas, sem comprometimento de atuação, mantendo uma relação de custo-benefício que viabiliza a automação quando implementado o retrofit proposto. Para tanto, serão desenvolvidos especificamente:

- a) Sistema de supervisão e controle das redes de distribuição subterrânea da NDB;
- b) Adequar a NDB às tecnologias necessárias para uso de Geração Distribuída nas topologias da RDS;
- c) Viabilizar o Gerenciamento Adequado dos Ativos na Concessionária e, portanto, um gerenciamento adequado dos recursos para aumento de eficiência energética;
- d) Proporcionar condições técnicas para um aumento efetivo na qualidade dos serviços prestados com reflexo direto na qualidade da energia;
- e) Padronização de protocolos em sistemas de monitoramento de estado dos equipamentos de subestação;
- f) Utilização de protocolos padronizados nos dispositivos eletrônicos inteligentes – (IED), de modo a obter ajustes dinâmicos adequados para cada situação da rede.

- g) Implementar módulos de sensoriamento e monitoramento em uma área piloto com equipamentos idênticos aos utilizados pela concessionária;
- h) Implementar um sistema de Geração Distribuída na área piloto de modo a permitir testes e que a concessionária possua um modelo de planejamento e treinamento quanto à implantação das tecnologias de GD;
- i) Implementar uma base de conhecimento (dados coletados dos IED e dos sensores) que possa ser utilizada na plataforma que a NDB utiliza ou considere como estratégica para vir a ser implementada;

1.4. Metodologia

As seguintes etapas compuseram a metodologia da pesquisa aplicada:

- a) Levantamento dos problemas existentes e das necessidades da concessionária frente ao desafio da implantação da Geração Distribuída em sua rede de distribuição, especificamente a RDS que inclui as redes Spot Network e Primário Seletivo;
- b) Compilação do estado da arte, principalmente para atualização da concessionária frente às alternativas que vêm sendo sugeridas ao redor do mundo sobre o tema e o que se encaixa com maior precisão nas suas necessidades;
- c) Verificando o estado atual das pesquisas correlatas a nível nacional e internacional também quanto a sistemas especialistas integrados da distribuição, que inclui o monitoramento e automação do funcionamento das chaves da RDS e suas necessidades frente à implantação de GD;
- d) Simulação das ocorrências levantadas junto à concessionária e à literatura, de modo que seja permitido replicar as falhas e propor soluções teóricas a partir destas simulações;
- e) Especificação e montagem dos equipamentos de um sistema piloto em laboratório que emule as estações transformadoras da concessionária e que permita testar os vários cenários (hipóteses)

simulados, para testes de bancada no desenvolvimento de equipamentos, antes de se partir para testes de área piloto;

- f) Especificação e montagem dos equipamentos de um sistema piloto com transformadores, chaves primárias, chaves secundárias (protetores de reticulado e disjuntores de 2kA) e quadros de baixa tensão de distribuição, além de uma microgeração distribuída fotovoltaica; área piloto necessária devido ao intenso nível de interferência que se pretende proporcionar às redes primárias e secundárias, sendo de difícil aplicabilidade diretamente em uma área da concessionária que atende consumidores;

A metodologia do projeto como um todo leva em conta o bom resultado da etapa anterior como premissa para o desenvolvimento da etapa seguinte. Portanto cada diretriz deve ter claramente definida seus objetivos, sua metodologia para alcançá-los e seu produto, permitindo assim que o desenvolvimento do projeto se mantenha sem sobressaltos.

As atividades gerais contempladas nas diferentes etapas anteriormente descritas foram:

- a) Especificação do sistema piloto: este sistema foi especificado a partir dos resultados esperados pelo mesmo, com base na nova tecnologia proposta nesta pesquisa sendo que, tal sistema deve ter capacidade suficiente para atender às aplicabilidades de monitoramento de equipamentos de subestação no que tange a esta finalidade
- b) Especificação dos equipamentos de ação local (sensores e relés com ajuste dinâmico de setup): uso de sensores e rede de comunicação redundante para atuação nos módulos de proteção dos equipamentos de modo que permita uma convivência entre a GD e a RDS, sem que haja restrição na capacidade de geração e facilite a atividade da concessionária na manutenção das estações transformadoras.
- c) Implementação de Hardware/Software/Applicativos de apoio: esta atividade, baseada na plataforma especificada no item anterior, trouxe para o sistema piloto todo o conhecimento até aqui adquirido que se julgou de interesse para o sistema. Foi um período longo e

de muitos testes, já que se agrupou muitas funções de equipamentos, juntamente com programação específica. Muitas simulações e ajustes foram realizados e, durante a realização dos testes, muitas combinações de fonte/carga foram utilizados para cobrir as possibilidades existentes em campo.

- d) Desenvolvimento de equipamentos e software: este período teve um cuidado especial com arquivos de prototipagem e documentações de programas, com um controle rígido de versões.
- e) Avaliação de desempenho: variáveis de operacionalidade e desempenho são importantes para avaliação da viabilidade técnico-econômica do sistema de setup dinâmico e de monitoramento da rede e a evolução da GD.
- f) Treinamento para capacitação dos profissionais da concessionária, cuja transferência de conhecimento foi feita ao longo do desenvolvimento das etapas do projeto, culminou com uma etapa específica, sempre ao final de cada ciclo, com palestras e exposições com conteúdo do programa para a capacitação da equipe técnica da concessionária na manutenção do sistema, capacitação em programação das lógicas digitais implementadas em equipamentos instalados como retrofit e capacitação para a execução da expansão do sistema, além das peculiaridades do monitoramento com módulo de GD implementado.
- g) Cada etapa teve seu produto avaliado para que a etapa seguinte tivesse condições iniciais satisfatórias de desenvolvimento.

1.5. Estrutura do Trabalho

Este estudo se concentra na integração de geração distribuída nas redes elétricas do tipo SPOT, abrangendo sete seções fundamentais que delineiam uma análise abrangente de seu desenvolvimento e culminam em conclusões de relevância para o campo da engenharia elétrica.

Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica aprofundada, que explora diversos aspectos dos sistemas de distribuição elétrica. Essa

revisão aborda as soluções disponíveis, analisa as proteções existentes e explora os desafios intrínsecos à interconexão dos sistemas de geração distribuída.

Com base nesse contexto substancial, definimos de maneira precisa os objetivos deste trabalho, que incluem tanto objetivos gerais quanto objetivos específicos. Nesse ponto, enfatizamos a pertinência da pesquisa para atender à crescente necessidade de incorporar a geração distribuída nas redes elétricas do tipo SPOT, considerando o cenário atual de fornecimento de energia.

A metodologia adotada para a realização deste estudo é detalhadamente descrita. Ela engloba o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e estratégias de integração destinadas a viabilizar a incorporação de fontes externas de geração nas redes elétricas existentes. Esse processo é conduzido de forma criteriosa, levando em consideração a preservação da eficácia das proteções de segurança já existentes.

Os resultados obtidos a partir da implementação do projeto são minuciosamente apresentados, proporcionando uma compreensão profunda das soluções desenvolvidas e suas implicações práticas. Este estudo oferece uma base sólida para a formulação de conclusões substanciais sobre o trabalho realizado, ressaltando a necessidade imperativa de prosseguir com pesquisas neste domínio em constante evolução.

Destaca-se que esta investigação contribui de forma significativa para a integração eficaz de sistemas de geração distribuída nas redes elétricas, fornecendo *insights* e perspectivas de extrema relevância para o avanço da engenharia elétrica e a garantia da confiabilidade e eficiência do fornecimento de energia no futuro.

2. Revisão Bibliográfica

2.1.1. Sistema de Distribuição Reticulado GRID

O sistema em malha do tipo Grid é composto por uma rede de transformadores interligados em baixa tensão, alimentados por diferentes circuitos de alimentação primária. A distribuição de energia de baixa tensão ocorre através de cabos, e os transformadores são colocados em locais espaçados, muitas vezes separados por um quarteirão, dependendo da densidade de carga da área. A distribuição não segue uma configuração linear, mas é em forma de "malha", o que significa que as cargas dos clientes podem ser abastecidas por múltiplos caminhos. A imagem a seguir ilustra uma parte de um sistema de rede do tipo Grid, sendo suprido por uma única subestação com três alimentadores primários.

Para garantir a redundância, a alimentação dos transformadores é distribuída entre os alimentadores primários, criando assim uma redundância na etapa primária. A confiabilidade é aumentada ao projetar os transformadores com uma capacidade superior à carga, de forma que, se um alimentador primário falhar devido a uma falha ou ativação da proteção na subestação, os transformadores restantes possam suportar a demanda. Portanto, na malha de cabos secundários, existem vários caminhos para fornecer energia às cargas, e dispositivos de proteção, como fusíveis, são utilizados nos equipamentos de proteção da rede para proteger os cabos.

2.1.2. Sistema Spot Network de Distribuição em Rede

Os sistemas de distribuição em tensão secundária do tipo Spot ou Grid são projetados com redundância para garantir a continuidade do fornecimento de energia. Geralmente, eles operam com tensões de 127/220 V ou 220/380 V (nos EUA, as tensões são um pouco diferentes: 208/120 V e 480/277 V), usando ligações secundárias em estrela nos transformadores que trabalham em paralelo na baixa tensão. Esses sistemas são comuns em áreas com alta densidade de carga, como áreas

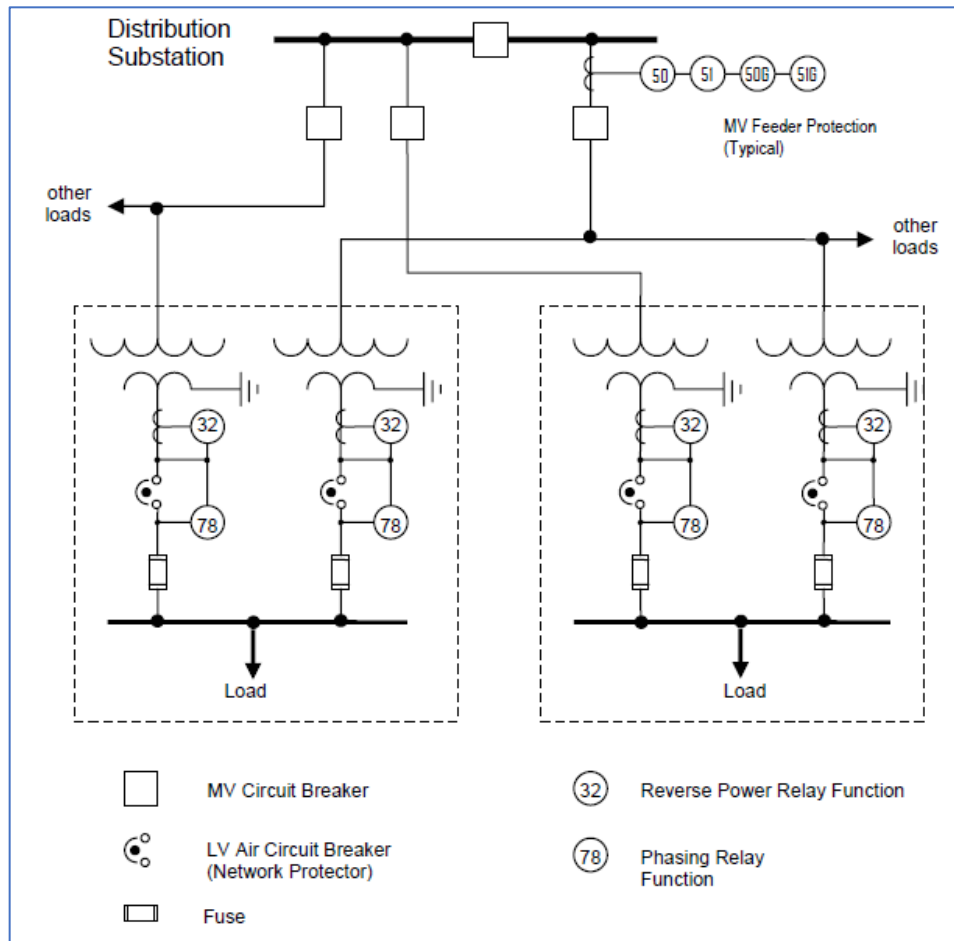
comerciais e regiões metropolitanas densamente povoadas, para minimizar o impacto de falhas no sistema primário em um menor número de consumidores. Regiões suburbanas normalmente não são atendidas por sistemas redundantes desse tipo. No entanto, devido à mudança no perfil de consumo em regiões suburbanas, com mais comércio, indústrias e condomínios, esses sistemas migraram para a periferia, desde que fosse viável do ponto de vista econômico para as concessionárias e clientes. Em áreas críticas, como aquelas com hospitais e grande fluxo de pessoas, interrupções de energia podem ter sérias consequências para a segurança pública e pessoal. Portanto, as redes com redundância oferecem segurança e flexibilidade em áreas densamente povoadas.

Os sistemas de distribuição em rede secundária contam com dispositivos de proteção chamados protetores de rede. Um protetor de rede é essencialmente um disjuntor de baixa tensão com uma câmara de extinção a ar, um mecanismo de operação e um relé eletrônico de controle. Se ocorrer uma falha em um cabo do sistema primário ou no transformador, o protetor se desliga devido ao fluxo reverso de potência, isolando o circuito com falha do circuito que fornece energia aos clientes. Isso evita distúrbios na rede de distribuição de baixa tensão. Mesmo se o alimentador primário falhar, a energia não será interrompida, pois outros alimentadores primários e transformadores, conectados em paralelo, continuarão a fornecer energia às cargas. Assim que a falha for resolvida e, dependendo da carga, os protetores de rede automaticamente reconectarão o circuito à rede de distribuição, restaurando o fornecimento de energia no ramal que estava com falha [3][4].

Esses sistemas são comumente aplicados em áreas de alta densidade de carga, como bairros comerciais metropolitanos. A figura a seguir mostra um sistema de rede spot típico, com duas unidades de rede.

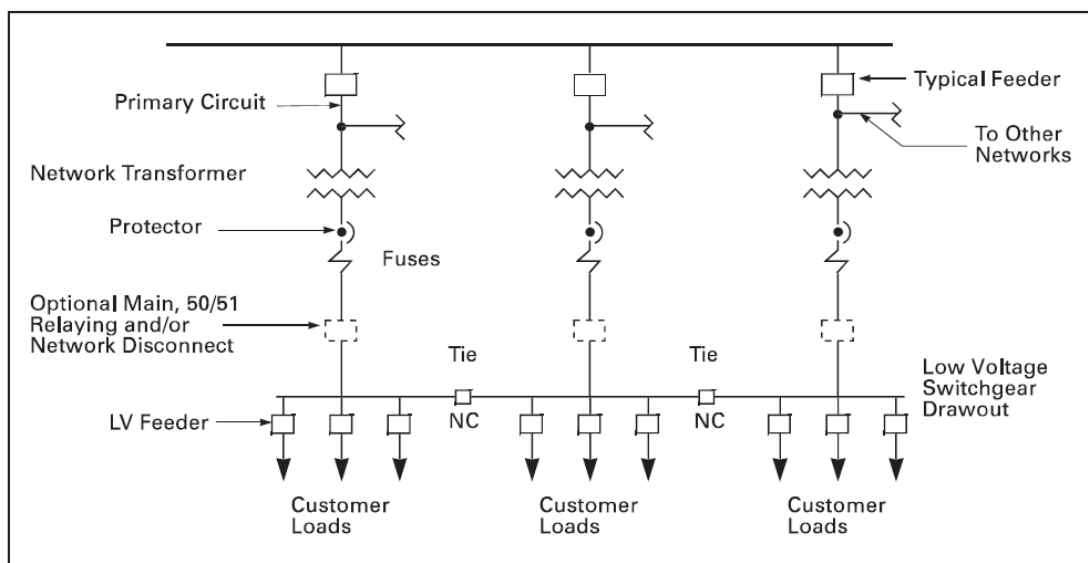
[Figura 1 abaixo]

Figura 1 – Dois sistemas do tipo Spot Network, com 2 transformadores cada ET.



Fonte: M. Behnke, 2005 [5]

Figura 2 – ET do tipo Spot Network típica, com 3 transformadores



Fonte: Eaton, "Spot Network Equipment", 2011[6]

As redes Spot têm as seguintes características:

- a) Uma rede spot consiste em dois ou mais transformadores de rede (uma rede spot de três transformadores é comum) que são paralelos no barramento secundário;
- b) Operam em sistemas de rede isolado, mas algumas concessionárias podem fornecer fontes alternativas para os alimentadores de rede primários;
- c) Em alguns casos, disjuntores de barramento secundário de ação rápida podem ser aplicados entre as seções do barramento para isolar faltas no comutador secundário e limitar o número de clientes sem energia, embora não são comuns visto os barramentos de saída possuírem proteção para seus cabos;
- d) Falhas nos circuitos primários ou falhas no transformador serão isoladas pela ação do equipamento Network Protector, sendo que a tensão será restabelecida após normalizado o problema;
- e) A carga da ET é projetada como N-1, ou seja, considera-se a carga plena de projeto, para o amplo benefício da redundância, como estando 1 transformador fora de serviço.

Nas redes Spot da maioria das concessionárias, uma falha ou falha do barramento paralelo (barramento coletor) resultará em uma interrupção do serviço. Esta é uma parte do sistema para a qual a redundância não existe para a maioria das concessionárias, portanto, seu design e integridade são de grande importância[7][8].

Além disso, para algumas concessionárias, uma falha no barramento de média tensão na subestação que fornece os alimentadores primários resultará em uma interrupção na rede. Isso não se aplica às concessionárias que possuem projetos de barramento em anel, projetos de barramento de dupla sincronização, etc., para suas subestações de média tensão[9][10].

2.1.3. Interconexão de GD com Redes de Distribuição

A presença das proteções ANSI 32 (direcional de potência) e ANSI 78 (medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo) nos

relés dos equipamentos protetores de redes tem como objetivo isolar falhas que ocorrem nos cabos primários. A proteção ANSI 32 atua quando há um fluxo de potência reverso em direção a uma falha no circuito primário, que está sendo alimentado por outros circuitos primários. Já a proteção ANSI 78 tem a função de religar o protetor quando as condições de tensão nas redes a montante e a jusante retornam aos valores pré-estabelecidos.

A proteção ANSI 32 pode ser ativada quando ocorre a inserção de geração distribuída (GD), pois qualquer excesso de energia gerada que não seja consumido na rede de baixa tensão pode ser devolvido aos circuitos primários da concessionária. Por outro lado, a proteção ANSI 78 pode impedir o religamento do protetor se houver variações nas condições de tensão entre os barramentos a montante e a jusante do sistema em malha.

A interferência da GD nas proteções ANSI 32 dos equipamentos protetores de rede pode inicialmente causar o efeito de ilhamento, o que não está em conformidade com os requisitos da norma IEEE 1547 para a interconexão de fontes de geração distribuída com sistemas de energia elétrica. Essa norma exige que a GD conectada à rede de distribuição não provoque ilhamento em um sistema que não seja projetado para operar de forma isolada.

O ilhamento em sistemas em malha ocorre quando o consumo na rede de distribuição secundária é menor do que a potência injetada na mesma rede pela GD. Isso é mais direto no sistema Spot, onde a GD é injetada diretamente no barramento de interligação dos transformadores. No sistema Grid, a disposição geográfica da GD pode afetar apenas uma "região" da malha, devido às características das impedâncias da rede. Quando o fluxo de GD diminui e o saldo entre a injeção e o consumo na rede de distribuição volta a favorecer o consumo, os equipamentos tendem a se religar. Esse efeito é mais crítico no sistema Spot com GD fotovoltaica, pois os inversores das usinas fotovoltaicas podem interromper o fornecimento, criando um efeito de liga e desliga, conhecido como "pumping". O efeito de pumping é explicado no apêndice

da norma IEEE que trata dos requisitos de funcionamento dos protetores de rede[11].

Nigel Ramon Jordan [12] conduziu simulações que mostraram interferência na estabilidade da rede secundária com o aumento do número de atuações e religamentos dos Protetores de Redes na presença de GD fotovoltaica, além de outros efeitos, como a indisponibilidade de parte da rede e dificuldades de religamento dos protetores, juntamente com o efeito de pumping.

As simulações incluíram falhas trifásicas em cada rede de alimentação nos alimentadores primários e demonstraram um aumento exponencial no número de casos à medida que a penetração da potência instalada da GD aumentava percentualmente. Todas essas simulações foram realizadas com uma carga mínima constante de 16% da carga nominal da rede secundária.

Dentre os diversos resultados significativos obtidos, vale ressaltar o número de desligamentos dos protetores de rede, que é o resultado das simulações de falhas em diferentes locais da rede primária. Esses resultados estão resumidos de forma concisa na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Efeito da inserção da GD fotovoltaica em rede secundária reticulada, pela variação da potência.

Potência da GD Fotovoltaica em relação à potência nominal da rede de distribuição secundária	0%	2%	5%	8%
Número de Trips no protetor de redes	1	2 a 5	19 a 22	56 a 57

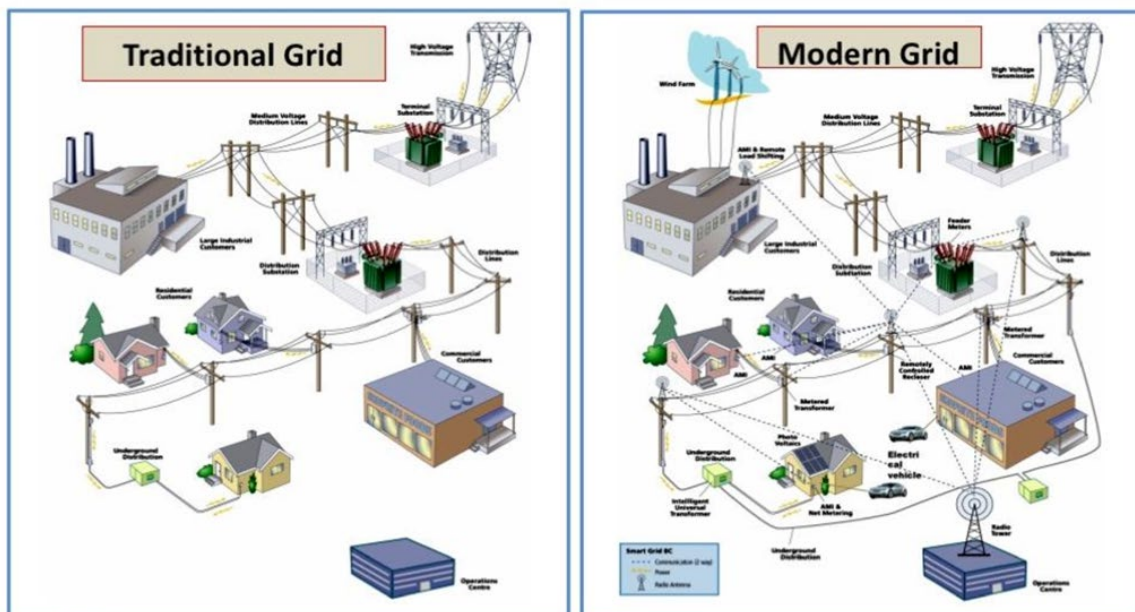
Além de analisar o número de vezes em que os protetores de rede são desligados, o autor também observou um aumento significativo nos efeitos de "pumping", que consiste em tentativas sequenciais do protetor de redes de religar após a resolução da falha. Para abordar esse problema, o pesquisador optou por aumentar a tensão de religamento de 1,4 V para 2,0 V, o que resultou em certa melhora no processo.

É importante notar que a variação na carga e na capacidade de geração distribuída (GD) cria inúmeras situações que não podem ser todas consideradas. No entanto, o impacto geral, que é a interferência da GD

nas redes de distribuição de baixa tensão, pode ser estimado, dada a expansão exponencial que temos testemunhado na instalação de GD, especialmente em painéis fotovoltaicos, nas áreas urbanas[13].

Com relação a interconexão de fontes alternativas de energia na rede elétrica (que não a principal, da concessionária de energia) e cargas não lineares existentes e crescentes, há o desafio de melhoria tanto dos atributos da rede de distribuição como da regulamentação para inserção destas fontes energéticas (limites de tensão, potência, distorção, variação de frequência). Tal regulamentação, anteriormente baseadas em geradores de usinas elétricas (hidrelétricas, térmicas, nucleares) e a rede de transmissão/subtransmissão/distribuição aos consumidores, passou a contar com pontos de interseção e inserção de energia (fontes alternativas distribuídas, do inglês distributed energy resources - DER), já amplamente divulgadas em estudos, mas que requerem evolução tanto da concepção das concessionárias quanto das normativas existentes. São as escolhas tecnológicas que se impõem aos órgãos reguladores, conforme o panorama elétrico contemporâneo (Modern Grid) comparado com o tradicional (Traditional Grid), mostrados na figura a seguir.

Figura 3 - Desafios da modernização da rede de distribuição



Fonte: HENDERSON, NOVOSEL e CROW, 2017 [14].

A Norma de referência para interconexão de fontes de geração distribuída com sistemas de energia elétrica é a norma IEEE 1547 (Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems), recentemente atualizada em 06/04/2018 [15]. Atualmente, existem oito normas complementares projetadas para expandir ou esclarecer o padrão inicial, constantes no site da IEEE:

- a) IEEE 1547.1, publicado em 07/01/2005, descreve os testes da interconexão para determinar se a fonte de geração distribuída está ou não em conformidade com os padrões [16].
- b) IEEE 1547.2, publicado em 15/04/2009, fornece uma base técnica sobre o padrão [17].
- c) IEEE 1547.3, publicado em 16/11/2007, detalha as técnicas de monitoramento de sistemas distribuídos [18].
- d) IEEE 1547.4, publicado em 20/07/2011, é um guia para o projeto, operação e integração de sistemas de geração distribuída [19].
- e) IEEE 1547.5, é específica para projetos de interconexão de fontes de geração ligadas em redes de transmissão maiores que 10 MVA. Entretanto, esta norma foi retirada de circulação em Dez/2011 e não retomada até então [20].
- f) IEEE 1547.6, publicado em 2011, descreve práticas para interconexões de geração distribuída em redes secundárias [21].
- g) IEEE 1547.7, publicado em 2013, fornece estudos de impacto para interconexão de fontes de geração distribuída na distribuição [22].
- h) IEEE P1547.8 Recommended Practice for Establishing Methods and Procedures that Provide Supplemental Support for Implementation Strategies for Expanded Use of IEEE Standard 1547 [23].

A família de normas IEEE 1547 não se refere a um manual de projetos, guia de aplicação, acordo de interconexão ou mesmo uma prescrição. Por exemplo, não trata da proteção da GD, nem planeja, projeta, opera ou mantém o sistema elétrico de distribuição. É sim um Padrão Técnico com requisitos funcionais para a interconexão em si, com testes de

interconexão, e não especifica um equipamento específico nem seu tipo, sendo um único documento (completo) de requisitos obrigatórios, uniformes e universais aplicáveis ao ponto de acoplamento no sistema de distribuição. Supõe-se que seja suficiente para a maioria das instalações, embora este projeto de P&D tenha liberdade de testar novas possibilidades não previstas, caso seja vantajoso para a NDB.

Embora haja certa rigidez tecnológica quando se trata de aplicação de uma norma, o grupo de trabalho que trata do assunto de interconexão de geração distribuída em redes de distribuição percebeu que tal engessamento poderia coibir o desenvolvimento de novas tecnologias. Por isso, a criação do complemento número 8 da Norma IEEE 1547 trouxe à discussão esta possibilidade de flexibilização. Esta norma se aplica aos requisitos estabelecidos no IEEE Std 1547 e fornece métodos que podem expandir o uso e a exclusividade da IEEE Std 1547 por meio da identificação de projetos inovadores, processos e procedimentos operacionais. O propósito dos métodos e procedimentos fornecidos é fornecer mais flexibilidade na determinação do projeto e dos processos usados na expansão das estratégias de implementação usadas para interconectar fontes distribuídas com sistemas de energia elétrica. Além disso, com base nos requisitos IEEE Std 1547, seu objetivo é fornecer a base de conhecimento, experiência e oportunidades para uma maior utilização da interconexão e suas aplicações.

Isto se encaixa perfeitamente e com contemporaneidade à proposição deste projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, visto que mesmo à luz de normas internacionais poder-se-á testar soluções inovadoras não previstas na família de normas IEEE 1547, embora seja necessário se ater às recomendações de segurança trazidos até então pela experiência dos pesquisadores e contidas nesta família de normas.

Além disso, foi publicado uma norma específica para relés de proteção de sistemas reticulados (este projeto estuda o sistema reticulado Spot Network) em interconexões entre a concessionária e o consumidor IEEE C37.95-2014 [24]. Apesar de tratar inicialmente de conexão com grandes consumidores, esta norma IEEE, revisada em 05/05/2014, apresenta

padrões de interconexão de consumidores com geração em paralelo com a rede, que é o caso da geração distribuída.

Os tópicos abordados de consumidores com geradores são:

- a) Consumidor com geração e sem conexão paralela à concessionária;
- b) Consumidor com geração em paralelo, mas sem previsão de exportação de energia para a concessionária;
- c) Consumidor com geração e potência planejada de exportação para a concessionária.

Ou seja, além do estudo da conexão da geração, o comportamento dos relés tem um regramento mínimo a ser atendido. Certamente, como conceituado na IEEE P1547.8 [23], o engessamento da pesquisa não deve ser estabelecido. Mas a experiência trazida à luz pelos grupos de trabalho com seus experts e especialistas, deve ser considerado.

Claramente, a conexão de sistemas de geração distribuída em sistemas tipo Spot Network deverá contemplar, e não alterar, os requisitos exigidos de funcionamento de relés de proteção especificados na norma IEEE C57.12.44-2014 Standard Requirements for Secondary Network Protectors, de 13/06/2014 [11]. Já para sistemas radiais com dupla alimentação (primário seletivo), os requisitos de funcionamento contidos na norma IEEE C37.95-2014 parecem ser suficientes, visto que estes operam em modo radial, ora com um primário, ora com outro (sem paralelismo).

A norma IEEE Std 1547-2013 - IEEE Guide for Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection [22] não se destina a abordar questões de estudo específicas pertinentes à rede secundária tipo Spot Network, que são abordadas especificamente pela IEEE Std 1547.6 - IEEE Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks [21]. No entanto, é relevante para muitos dos requisitos de estudo para Geração Distribuída em redes secundárias e redes Spot.

A norma IEEE 1547/2018 apresenta um estudo inicial específico para inserção de GD nas redes secundárias de distribuição tipo Spot e Grid Network, assim separados:

- a) Protetores de rede e requisitos do esquema de transferência automática;
- b) Redes secundárias de redes de distribuição;
- c) Redes de pontos secundários de distribuição.

Entretanto, esta norma não se aprofunda em assuntos específicos deste sistema de distribuição. Já a norma IEEE 1547-6/2011 [21], que descreve práticas para interconexões de GD especificamente nas redes secundárias, traz recomendações e orientações para GD interconectadas nas redes secundárias de distribuição, incluindo redes Spot e Grid. Fornece também uma visão geral do projeto, componentes e operação dos sistemas de rede secundária de distribuição, traçando considerações para interconexão de GD com este tipo de redes, e fornece soluções potenciais, mas não definitivas, para a interconexão de GD nestes sistemas.

Como já visto, a norma IEEE Std 1547.6-2011 faz parte da série de normas IEEE 1547, que fornece requisitos obrigatórios para a interconexão de GD com o sistema elétrico e se concentra principalmente em interconexões de circuitos de distribuição radial que deve ser atendida para, por exemplo, o sistema primário seletivo. Já para a conexão de GD aos sistemas Spot e Grid Network, antes do atendimento de sua norma específica IEEE Std 1547.6-2011, toda a norma básica IEEE 1547 precisa ser atendida.

O IEEE Std 1547.6-2011 foi desenvolvido especificamente para fornecer informações adicionais em relação à interconexão de GD com redes secundárias de distribuição.

2.1.4. Especificações Técnicas E Requisitos De Interconexão de GD

2.1.4.1. Definições da norma IEEE Std 1547

São as seguintes as definições contidas na norma IEEE Std 1547 [15]:

- a) Operador do sistema de energia elétrica da área (Operador da Área EPS): a entidade responsável por projetar, construir, operar e manter o EPS da Área.
- b) Deixar de energizar: cessação da capacidade de saída de energia.
- c) Teste de projeto: teste de um ou mais dispositivos feitos para um determinado projeto para mostrar que o projeto atende a certas especificações.
- d) Geração distribuída (DG): instalações de geração elétrica conectadas a uma área EPS através de um PCC; um subconjunto de GD.
- e) Geração Distribuída (GD): Fontes de energia elétrica que não estão diretamente conectadas a um sistema de transmissão de energia em massa. A GD inclui tanto geradores quanto tecnologias de armazenamento de energia.
- f) Sistema de energia elétrica (EPS, do inglês Electric Power System): Instalações que fornecem energia elétrica para uma carga. NOTA - Isso pode incluir unidades de geração.
- g) Sistema de energia elétrica de Área (EPS de área): um EPS que serve EPS locais. NOTA - Normalmente, um EPS de Área tem acesso primário a direitos de passagem públicos, prioridade de passagem de limites de propriedade, etc., e está sujeito à supervisão regulamentar.
- h) Sistema de energia elétrica, local (EPS local): um EPS contido inteiramente dentro de uma única instalação ou grupo de instalações.
- i) Interconexão: o resultado do processo de adicionar uma unidade GD a um EPS da área.
- j) Equipamento de interconexão: dispositivos individuais ou múltiplos usados em um sistema de interconexão.
- k) Sistema de interconexão: a coleta de todos os equipamentos e funções de interconexão, tomados como um grupo, usados para interconectar uma unidade GD (s) a um EPS da Área.

- l) Inversor: uma máquina, dispositivo ou sistema que altera a energia de corrente contínua para energia de corrente alternada.
- m) Ilha: condição na qual uma parte de um EPS da Área é energizada somente por um ou mais EPSs Locais através dos PCCs associados, enquanto que essa parte do EPS da Área é eletricamente separada do restante do EPS da Área.
- n) Ilha, intencional: uma ilha planejada.
- o) Ilha, não intencional: uma ilha não planejada.
- p) Não-ilhamento: destinado a impedir a existência continuada de uma ilha.
- q) Ponto de acoplamento comum (PCC): o ponto onde um EPS Local está conectado a um EPS de Área.
- r) Ponto de conexão de recursos distribuídos (ponto de conexão GD): o ponto onde uma unidade GD é eletricamente conectada em um EPS.
- s) Utilitário simulado: um conjunto de equipamentos de teste de tensão variável e frequência variável usados para simular uma fonte de utilidade normal.
- t) Distorção de demanda total (TDD): A distorção de corrente harmônica quadrada de soma raiz total, em porcentagem da corrente de carga de demanda máxima (demanda de 15 ou 30 minutos).
- u) Distorção total de corrente nominal (TRD): a soma quadrática de soma total dos harmônicos de corrente criados pela unidade GD operando em uma carga linear balanceada dividida pela maior demanda de corrente de carga de teste (IL) ou capacidade atual da unidade GD (I_{rated}).

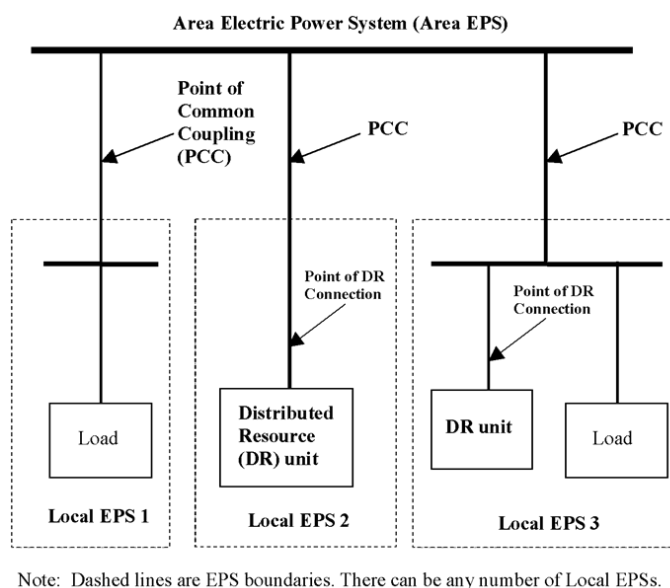
2.1.4.2. Considerações acerca dos pontos de intersecção de GD na rede

Há que se fazer uma distinção entre o ponto comum de conexão (PCC) vs. Ponto de Geração Distribuída GD, conforme Figura 4:

- a) Os requisitos devem ser atendidos no ponto de acoplamento comum (PCC), embora os dispositivos usados para atender a esses requisitos possam estar localizados em outro local.

- b) Este padrão aplica-se à interconexão com base na classificação agregada de todas as unidades de GD que estão dentro do Sistema de Energia Elétrica (do inglês EPS – Electrical Power System).
- c) As funções do hardware e software do sistema de interconexão que afetam o EPS da Área são necessárias para atender a esse padrão, independentemente de sua localização no EPS.
- d) As especificações e requisitos, tanto técnicos como de teste, são universalmente necessários para a interconexão de GD, incluindo máquinas síncronas, máquinas de indução ou inversores/conversores de energia, e são suficientes para a maioria das instalações.
- e) Requisitos técnicos e/ou testes adicionais podem ser necessários para algumas situações específicas.

Figura 4 - Relação entre os termos de interconexão descritos na norma IEEE 1547.



Fonte: IEEE 1547 - 2018, 2018

Os requisitos desta cláusula devem ser atendidos no PCC, embora os dispositivos utilizados para atender a esses requisitos possam estar localizados em outro local. Os requisitos se aplicam à interconexão de uma unidade de GD única com base na classificação dessa unidade ou em várias unidades de GD em um único EPS local, com base na classificação agregada de todas as unidades de GD que estão no EPS local. As funções

do hardware e software do sistema de interconexão que afetam o EPS da Área são necessárias para atender a esse padrão, independentemente de sua localização no EPS.

Os requisitos deste tópico são funcionais e não especificam nenhum tipo específico de equipamento. As especificações e requisitos técnicos declarados são universalmente necessários para a interconexão de GD, incluindo máquinas síncronas, máquinas de indução ou inversores / conversores de potência estáticos, e serão suficientes para a maioria das instalações (requisitos técnicos adicionais podem ser necessários para algumas situações limitadas).

2.1.4.3. Redes De Pontos Secundários De Distribuição Spot E Grid

Os protetores de rede não devem ser usados para separar, alternar, servir como backup de falha do disjuntor ou isolar de qualquer maneira um alimentador principal de rede ou rede ao qual a GD está conectado do restante do EPS da área, a menos que os protetores sejam classificados e testados de acordo com os padrões aplicáveis para tal aplicação.

Qualquer instalação de GD conectada a uma rede spot não deve causar operação ou impedir o religamento de quaisquer protetores de rede instalados na rede spot. Esta coordenação deve ser realizada sem a necessidade de quaisquer alterações nas práticas de tempo de compensação do protetor de rede prevalentes no EPS da Área.

A conexão da GD ao EPS de Área só é permitida se:

- a) O barramento de rede EPS da Área já estiver energizado por mais de 50% dos protetores de rede instalados.
- b) A saída de GD não causará nenhuma ciclagem de protetores de rede.
- c) A carga do equipamento de rede e a capacidade de interrupção de falhas não devem ser excedidas com a adição de GD.
- d) As instalações de GD em uma rede spot, usando um esquema de transferência automática no qual a carga é transferida entre a GD e o EPS em uma operação momentânea de “make before break” - ligar antes de abrir, devem atender a todos os requisitos desta cláusula independentemente da duração do paralelismo.

Os critérios e requisitos da família de normativas IEEE 1547 são aplicáveis a todas as tecnologias de fontes de geração distribuída com potência até 10 MVA, interconectados em tensões de distribuição primária e/ou secundária típicas. A instalação de geração distribuída (GD) em sistemas de distribuição primária e secundária radiais é a ênfase principal desta norma, embora a instalação de GD em sistemas reticulados ou spot de distribuição seja considerada.

Finalmente, a norma IEEE Std 1547 não define a capacidade máxima de GD para uma instalação específica que pode ser interconectada a um único ponto de conexão da rede elétrica, ou conectada a um determinado alimentador. Além disso, a normativa:

- a) Não prescreve um sistema de coordenação ou mesmo da proteção de GD ou todos os requisitos de operação para unidades GD.
- b) Não trata do planejamento, projeto, operação ou manutenção do EPS da área.
- c) Não se aplica a esquemas de transferência automática em que a carga é transferida entre a GD e o EPS em uma operação momentânea de fazer antes de romper, desde que a duração da paralelização das fontes seja menor que 100 ms, exceto conforme observado em seu item 4.1.4 (geração distribuída em redes secundárias e redes spot de distribuição).

Legalmente, pelo menos é o que prevê a normatização, há o requisito de que quando exigido pela ANEEL, que tem jurisdição sobre a interconexão de GD, um estudo pode ser conduzido para determinar se todos os requisitos deste item foram atendidos quando a GD instalada em uma rede spot excede 5% da carga máxima da rede spot.

Os tópicos de todas as normativas de referência serão abordados no decorrer do projeto de pesquisa como parâmetro a ser seguido, ou proposição a ser apresentada.

2.1.4.4. Proteção de Transformadores de Rede. Normativa IEEE

Atenção especial deverá ser dada aos transformadores da rede. A IEEE C37.108/2002 - Guia para a Proteção de Transformadores de Rede, apresenta uma normativa, datada de 13/09/2002, que trata especificamente do assunto transformadores da rede de distribuição. Seus princípios também devem ser seguidos e sua descrição se encontra a seguir:

- a) Escopo: Revisar e atualizar o Guia para Proteção de Transformadores de Rede, ANSI C37.108-1989.
- b) Propósito: Este guia auxilia os engenheiros, fornecedores e clientes de serviços de proteção de relés a abordar o uso da proteção de transformadores de rede por produtores de energia independentes. Além disso, o guia será revisado para introduzir novas proteções e técnicas de transformadores que podem incluir relés digitais, fibra ótica, detectores de ultravioleta e dispositivos de proteção contra limitação de corrente.
- c) Resumo: Esta norma IEEE faz parte da família C37 sobre painéis, subestações e relés de proteção. São estabelecidas diretrizes para a aplicação de protetores de rede, inclusive. O uso de transformadores de rede e protetores com recursos distribuídos é abordado.

2.1.4.5. Proteção de Redes Spot Network

Segundo dados compilados pela National Renewable Energy Laboratory [5], as seguintes categorias / pontos de atenção devem ser levados em consideração em projetos e regulagens de redes de distribuição do tipo Spot Network:

- d) Considerações de projeto da rede:
 - Tamanho, tipo, número de protetores de rede e tensão da rede;
 - Ajustes dos relés dos protetores de rede;
 - Nível de automação e da manutenção da instalação e da GD proposta.
- e) Trip não desejados ou espúrios:
 - Potência reversa;
 - Falha não prevista.

f) Operação do Protetor de Redes

- Bombeamento;
- Fechamento.

g) Projeto e Operação da Geração Distribuída

- Condições normais;
- Condições de falha;
- Coordenação (ajustes e comunicação);
- Segurança.

h) Ilhamento

Para cada subcategoria, deverá ser necessário desenvolver orientações específicas, quais as principais condições se aplicam, quais soluções e necessidades se acredita existirem e a prioridade.

Ou seja, do lado da concessionária se estabelece uma batelada de procedimentos de análise de engenharia, para verificar cada uma das possibilidades de ocorrência que possam vir a interferir na operação da rede de distribuição Spot. As considerações a serem estudadas pelo lado da concessionária, que gerarão um documento de permissão/negação ou restrição ao cliente instalador da usina (mini, micro, etc.) na rede Spot que foram sugeridas [23] estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Considerações a serem estudadas pelo lado da concessionária para permissão, negação ou restrição de instalação de GD em sistema Spot Network.

•Coordenação		Que tipo de comunicação é necessária entre os protetores e o GD?
•Impacto de GD no equipamento/operação rede	no	Como o GD irá causar (prevenir) falsos disparos ou impedir o fechamento dos protetores?
•Impacto de GD no equipamento/operação rede	no	Algum equipamento de rede ficará sobrecarregado por causa da interconexão GD?
•Impacto de GD no equipamento/operação rede	no	Que efeitos o GD terá nos relés do protetor de rede e quais são os novos critérios de configuração do relé?
•Impacto de GD	no	Como a presença do GD afetará a resposta dos

equipamento/operação de rede	protetores a falhas fora de suas zonas de proteção?
•Impacto de GD no equipamento/operação de rede	A operação de um dispositivo de sobrecorrente monofásico (fusível protetor) é uma preocupação com a presença de GD?
•Requisitos de paralelismo de GD	Quais condições devem ser satisfeitas antes que o paralelismo seja permitido? Qual será o procedimento de paralelismo?
•Requisitos de GD	Será necessário um transformador dedicado para o GD?
•Configuração de rede	Como os requisitos variam com o número de transformadores de rede?
•Configuração de rede	Os requisitos serão diferentes para redes de 208 V e 480 V devido aos diferentes arcos voltaicos?
•Configuração de linha de rede	Os requisitos de proteção diferentes se aplicarão aos sistemas de rede fornecidos a partir de primários de três e quatro fios? Com transformadores delta-estrela ou estrela-estrela?
•Os disjuntores dos protetores não são projetados para interromper a corrente de falta dos geradores ou suportar condições desfasadas na chave aberta.	Como o protetor será impedido de isolar GDs do sistema da concessionária?
•Energia reversa através do protetor de rede	Qual seria uma relação aceitável da corrente de carga mínima do cliente sobre a saída GD máxima para eliminar qualquer possibilidade de alimentação reversa através de um protetor?
•Energia reversa através do protetor de rede	Que ação precisa ser tomada com uma perda repentina de grande carga?
•Energia reversa através do protetor de rede	As oscilações de energia ou perda de sincronismo por geradores rotativos podem causar energia reversa através de um protetor de rede?
•Ilhamento não intencional dentro da rede	Se o GD sofrer ilhamento, como o relé mestre será impedido de religar a chave protetora durante uma condição fora de sincronismo?

Fonte: Autoral

Nota-se que, pelo lado da concessionária, para o atendimento de cada uma das solicitações de instalação de GD por parte dos clientes, há que ter uma análise importante e complexa de possibilidades, inclusive para expansão, quem tem levado mais à limitação da potência instalada do que buscar a convivência entre as tecnologias.

Este trabalho busca solucionar, por parte da concessionária, todas estas questões de modo que, podendo conviver as tecnologias do Spot Network e GD em harmonia sem que haja necessidade de projetos complexos de engenharia. Além de apresentar ferramentas computacionais de monitoramento da expansão da GD na rede, de modo que ligações clandestinas possam ser detectadas facilmente. É desejável, conveniente e contemporâneo, visto as instalações de GD estarem em franca expansão.

3. PROPOSTA

A proposta deste trabalho acadêmico é abordar a integração eficiente da Geração Distribuída (GD) na Rede de Distribuição Subterrânea (RDS) da CEB/NDB, com foco especial no sistema Spot Network. O objetivo principal deste projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) é desenvolver um protótipo de adaptação (retrofit) nas Estações Transformadoras (ET) da RDS para garantir o funcionamento adequado dos equipamentos, mesmo em face da crescente presença de GD na rede de distribuição.

Para alcançar esse objetivo, o projeto visa resolver um desafio crítico conhecido como "efeito de ilhamento," que ocorre quando a potência gerada pela GD excede o consumo local, resultando no desarme da proteção e no isolamento dos consumidores. Este fenômeno é proibido pelas normativas estabelecidas pelo IEEE 1547 e representa um obstáculo significativo para a integração da GD.

A solução proposta envolve a instalação de sensores de corrente nos ramais de saída de baixa tensão da ET, juntamente com o desenvolvimento de um dispositivo denominado Concentrador de Geração Distribuída (C-GD). Esse concentrador, por meio de algoritmos especialistas, monitora o nível de GD presente na ET e realiza ajustes dinâmicos nos relés de proteção dos Protetores de Rede, permitindo que a potência reversa flua da GD para a rede da concessionária de forma controlada e sem desarmar a proteção.

O resultado esperado deste projeto é a viabilização de uma coexistência harmoniosa entre a Geração Distribuída e o sistema Spot Network, sem a necessidade de ajustes que possam limitar a quantidade de energia gerada por GD ou causar implicações legais. Esta pesquisa contribui para resolver um impasse persistente na integração da GD na rede de distribuição, oferecendo uma solução prática e eficaz para o problema do "efeito de ilhamento."

Ao longo deste trabalho acadêmico, serão explorados os detalhes técnicos, a metodologia de implementação, os resultados obtidos e as

conclusões relevantes para o avanço da integração da Geração Distribuída nas redes de distribuição elétrica.

4. ESTUDO DE CASO

Para melhor entendimento das interferências da GD e análise de vários cenários, foi montada uma estrutura de simulação e posteriormente emuladas estas ocorrências injetando sinais diretamente nos relés do Spot Network. Foi uma etapa de levantamento de dados para desenvolvimento dos equipamentos do projeto, prévia aos ensaios na área piloto.

Nesta etapa nas atividades buscou-se a validação das simulações realizadas com os softwares em uma bancada de testes e com os equipamentos de monitoramento e proteção que compreendem a rede de distribuição SPOT da NDB, cuja influência da GD é especificamente notada quanto a distúrbios nas proteções dos relés do equipamento Network Protector (protetor de rede), além das interferências tradicionais nos circuitos radiais e de primário seletivo como sobrecarga e fator de potência.

Com isso, foi realizado os testes de funcionamento (emulação de ocorrências) da rede de distribuição com inserção de GD instalada junto aos clientes da concessionária. A fonte utilizada, hexafásica, foi programada para alimentar as tensões do lado rede e do lado transformador, e inseriu no canal de corrente correntes positivas e negativas em relação à tensão, de modo a fazer operar as proteções do relé do protetor de redes como em funcionamento na rede subterrânea. Com a inserção de fluxo de potência negativa consistente e significativa frente aos relés dos protetores de rede, foi possível medir o comportamento destes equipamentos e comprovar a influência da GD na abertura indesejada dos relés por potência reversa e testar opções de ajustes que impediriam estas aberturas indesejadas, visto não se consistirem em falha na rede (e portanto, exigissem ação dos relés de proteção).

Foram montados três setups distintos de testes para:

- a) Replicar o processo da inserção de GD, abertura da proteção por potência reversa e a reconexão à rede da concessionária – configuração tradicional;

- b) Verificar a atuação da regulação automática do setup de potência reversa permitida para o nível de potência de GD inserida pelo cliente e a não abertura de um dos protetores, não permitindo o Ilhamento;
- c) Inserção de uma falha na rede primária, para demonstrar como fica preservada a atuação (trip) do relé de proteção - proteção por potência reversa vinda do transformador em paralelo, mesmo com a inserção de GD e o respectivo ajuste no setup do relé para compensá-la.

Para os três testes distintos foram utilizados os seguintes equipamentos:

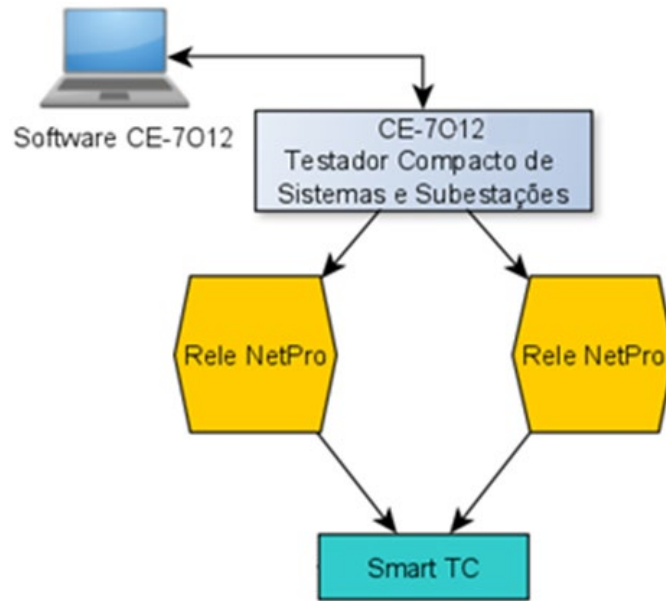
- a) Relê NetPro utilizado do protetor de redes da empresa Futura Engenharia;
- b) Medidor de grandezas elétricas do CBT (Smart TC) da empresa Pronutec;
- c) Sistema de interconexão com o SCADA da empresa Altus (Xtorm);
- d) Testador Compacto para Sistemas de Subestações (CE – 7012) da empresa Conprove;

Obs: os reles NetPro estão supervisionados pelo SCADA BluePlant, instalado também na área piloto para monitoramento dos ativos.

De acordo com a Figura 5 pode-se notar a interligação do sistema e na Figura 6 como foi interligado na bancada no laboratório de testes da USP.

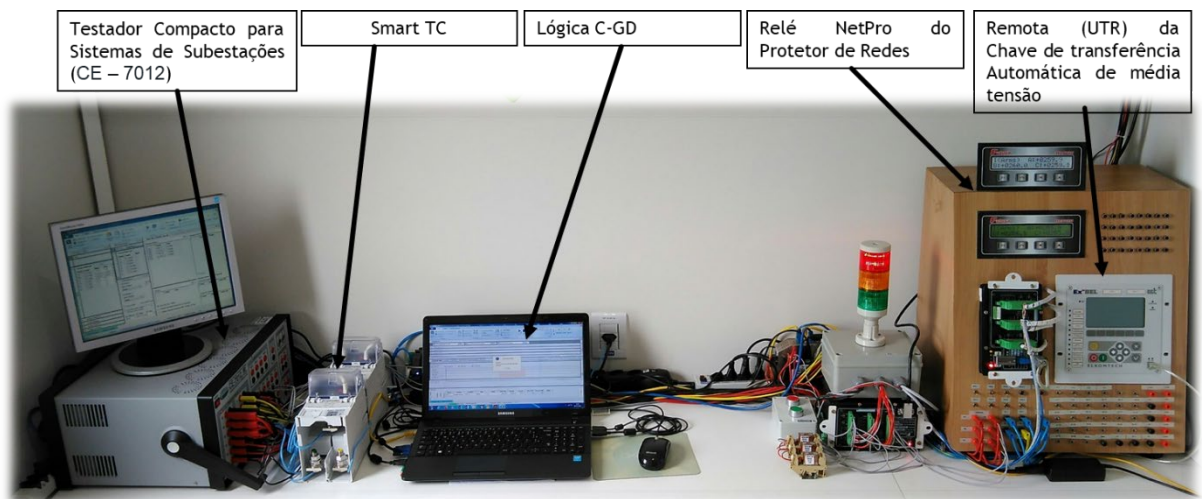
[Figura 5 abaixo]

Figura 5 - Interligação dos equipamentos para o setup de testes



Fonte: Autoral

Figura 6 - Montagem da bancada de testes para emulação de falhas na rede Spot



Fonte: Autoral

A geração distribuída como item de interferência da RDS foi analisada em situações de falhas. Para montagem dos testes, baseado nas necessidades dos algoritmos, foram adquiridos alguns equipamentos, outros pertencentes ao próprio laboratório. Os 3 (três) testes principais, estão discriminados e apresentados de forma condensada a seguir. Testes iniciais ou intermediários não foram apresentados, mas foram importantes para chegar-se aos resultados apresentados. Todo o processo

de ajuste da fonte CE-7012 foi apresentado, para acompanhamento dos tempos de ajuste de rampas da GD, das cargas, da flutuação das tensões, etc.

4.1. Configuração do Testador Compacto CE-7012

Para este teste foi feita a configuração do CE-7012 para emular o comportamento da rede de distribuição; esta configuração se iniciou com o ajuste para fechamento dos relés NetPro conforme a Figura 7.

Figura 7 - Configuração para fechamento dos relés NetPro.

001	Inicialização do Rele	20,50 s
-----	-----------------------	---------

Fonte: Autoral

Após esta configuração, seguiu-se com os ajustes de tensão de REDE (VREDE) e correntes injetadas no relê NetPro (Figura 8 e Figura 9):

- a) 1A no secundário que resultou em 400A no primário do relê NetPro;
- b) 127V trifásico inicialmente, decrementando 50mV até atingir 125V o que provocou o fechamento dos protetores.

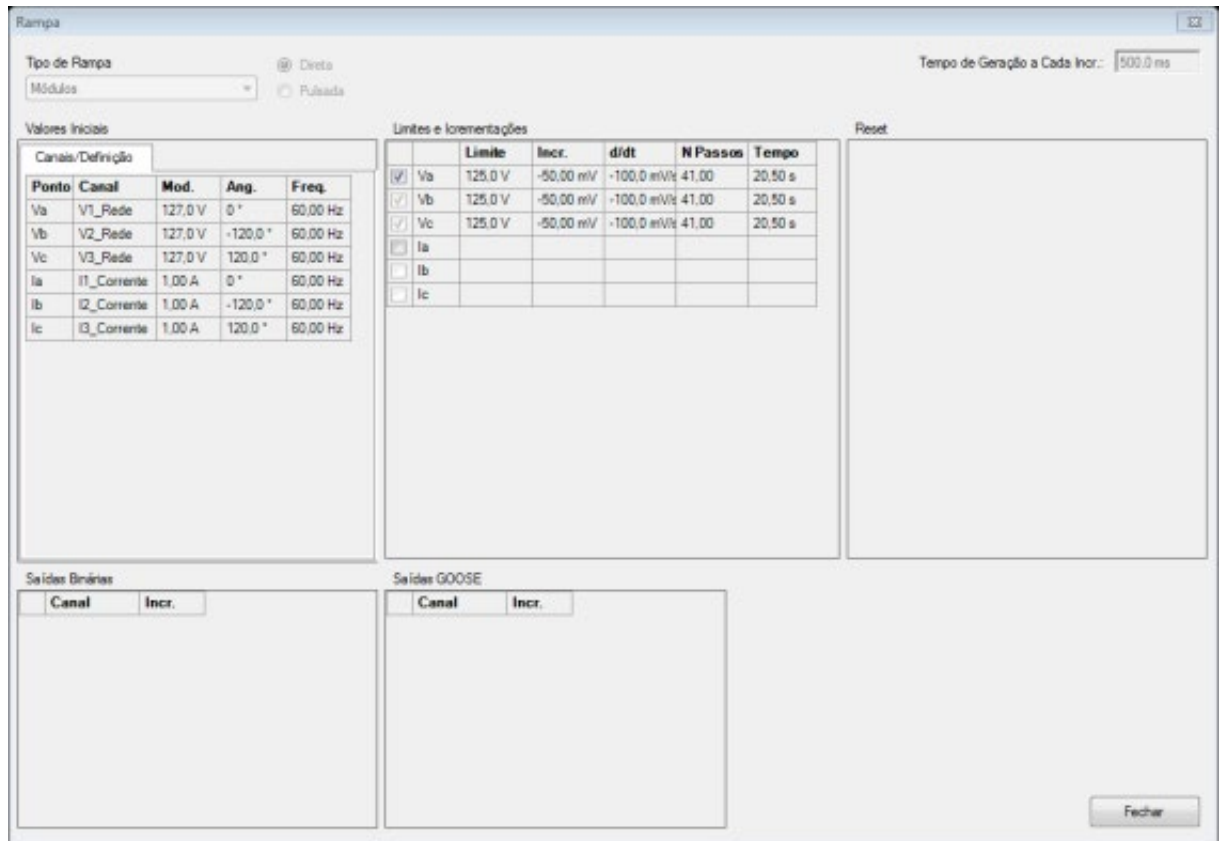
Figura 8 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado REDE com relação ao lado TRAFO (seis tensões disponíveis para o relê quando o protetor está aberto).

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Rede	Módulos <input type="button" value="..."/>
Vb	V2_Rede	tlncr 500,0 ms
Vc	V3_Rede	
Ia	I1_Corrente	
Ib	I2_Corrente	
Ic	I3_Corrente	

Fonte: Autoral

[Figura 9 abaixo]

Figura 9 - Configuração do CE-7012 para tensões de Rede e correntes trifásicas.



Fonte: Autoral

No próximo passo ajustou-se os valores de tensão do lado de Trafo do relé NetPro em 127V com 1.00° de defasagem entre VTRAFO e VREDE , conforme as configurações da Figura 10 e da Figura 11, mantendo-se esse ajuste para forçar o fechamento dos protetores.

Figura 10 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado Trafo.

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Trafo	Módulos
Vb	V2_Trafo	tlncr 1,00 s
Vc	V3_Trafo	

Fonte: Autoral

[Figura 11 abaixo]

Figura 11 - Configuração do CE-7012 para Tensão Rede e Corrente

Tipo de Rampa: Direta Pulsada

Tempo de Geração a Cada Incr.: 1,00 s

Valores Iniciais

Ponto	Canal	Mod.	Ang.	Freq.
Va	V1_Trafo	127,0 V	1,00 °	60,00 Hz
Vb	V2_Trafo	127,0 V	-119,0 °	60,00 Hz
Vc	V3_Trafo	127,0 V	121,0 °	60,00 Hz

Limites e Incrementações

	Limite	Incr.	d/dt	N Passos	Tempo
<input type="checkbox"/> Va					
<input type="checkbox"/> Vb					
<input type="checkbox"/> Vc					

Saídas Brâs

Canal	Incr.

Saídas GOOSE

Canal	Incr.

Fechar

Fonte: Autoral

No próximo setup colocou-se o decremento da corrente vinda da rede da concessionária, simulando a inserção em rampa de uma nova fonte no cliente (Figura 12).

Figura 12 - Setup do início do decremento da corrente

002	Decremento da corrente	10,25 s
-----	------------------------	---------

Fonte: Autoral

Este decremento inicializou-se com 1A no secundário (400A na IHM do Relê NetPro, ajustado para uma relação de 400:1), reduzindo a uma taxa de 25mA a cada passo até anular a corrente em potência direta vinda da concessionária. Daí em diante ocorrerá a transição para corrente reversa “vista” nos protetores. Neste ponto de corrente reversa é onde verificou-se o excesso de potência produzida pela fonte secundária, que

emula o retorno da GD produzida em um cliente da concessionária e não consumida pela própria rede BT, retornando para a rede de média tensão.

Após este ajuste, seguiu-se com o ajuste de tensão e corrente do lado da Rede (Figura 13 e Figura 14), simulando a subida da tensão do barramento devido à diminuição da carga consumida pela rede da concessionária:

- a) Tensão de REDE: foi ajustado para 127V, retorno em rampa do valor anterior de 125V;
- b) CORRENTE: iniciou-se com 1A no secundário, reduzindo-se a passos de 25mA até atingir 0A de corrente em potência direta na simulação.

Figura 13 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado Rede

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Redde	Módulos <input type="button" value="..."/>
Vb	V2_Redde	tincr 250,0 ms
Vc	V3_Redde	
Ia	I1_Corrente	
Ib	I2_Corrente	
Ic	I3_Corrente	

Fonte: Autoral

[Figura 14 abaixo]

Figura 14 - Configuração do CE-7012 para Tensão Rede e Corrente

Rampa

Tipo de Rampa: Módulos (Direta / Pulsada)

Tempo de Geração a Cada Incr.: 250.0 ms

Valores Iniciais

Ponto	Canal	Mod.	Ang.	Freq.
Va	V1_Rele	127,0 V	0°	60,00 Hz
Vb	V2_Rele	127,0 V	-120,0°	60,00 Hz
Vc	V3_Rele	127,0 V	120,0°	60,00 Hz
Ia	I1_Corrente	1,00 A	0°	60,00 Hz
Ib	I2_Corrente	1,00 A	-120,0°	60,00 Hz
Ic	I3_Corrente	1,00 A	120,0°	60,00 Hz

Limites e Incrémentações

	Limite	Incr.	d/dt	N Passos	Tempo
<input type="checkbox"/> Va					
<input type="checkbox"/> Vb					
<input type="checkbox"/> Vc					
<input checked="" type="checkbox"/> Ia	0 A	-25,00 mA	-100,0 mA/s	41,00	10,25 s
<input checked="" type="checkbox"/> Ib	0 A	-25,00 mA	-100,0 mA/s	41,00	10,25 s
<input checked="" type="checkbox"/> Ic	0 A	-25,00 mA	-100,0 mA/s	41,00	10,25 s

Reset

Saídas Binárias

Canal	Incr.

Saídas GOOSE

Canal	Incr.

Fechar

Fonte: Autoral

Feitos os ajustes indicados, passou-se ao ajuste de tensão do lado Trafo onde se manteve as configurações de 127V e 1.00° de defasagem. A seguir ajustou-se a injeção de potência reversa no circuito. Neste caso se assume que a potência gerada pela fonte secundária (que pode ser uma geração solar, por exemplo, ou qualquer outra) pelo cliente se torna maior que a potência consumida por todos os clientes interligados neste barramento de baixa tensão. Assim o saldo da potência gerada no consumidor passa a retornar para a rede elétrica da concessionária, caracterizando-se a interferência da geração distribuída na rede Spot. Para tanto, iniciou-se configurando o tempo de inicialização desta potência reversa conforme Figura 15.

Figura 15 - Configuração do início da potência reversa

003	corrente reversa	10,25 s
-----	------------------	---------

Fonte: Autoral

Com isto configurado, é necessário configurar a tensão do lado de Rede injetada nos Relês NetPro (Figura 16 e Figura 17):

- a) Manteve-se a tensão de 127V;
- b) Nos ajustes da corrente, foi iniciado com 0,00 A e incrementando 25mA a cada passo com um ângulo ajustado de 180° de defasagem até atingir 1,00 A (equivalente a 400A negativos na IHM do relé Netpro).

O ajuste de tensão do lado Trafo se manteve nas configurações de 127V e 1.00° de defasagem.

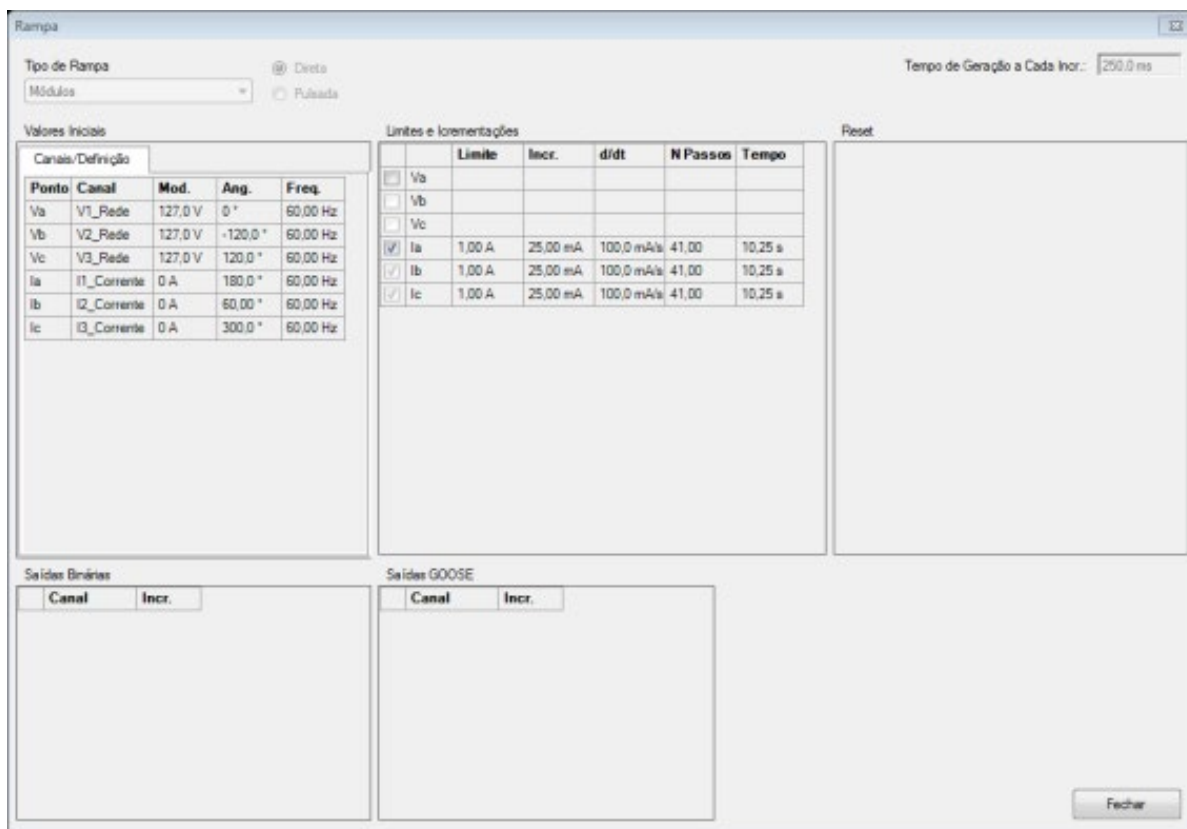
Figura 16 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado Rede

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Rede	Módulos <input type="button" value="..."/>
Vb	V2_Rede	tIncr 250,0 ms
Vc	V3_Rede	
Ia	I1_Corrente	
Ib	I2_Corrente	
Ic	I3_Corrente	

Fonte: Autoral

[Figura 17 abaixo]

Figura 17 - Configuração do CE-7012 para Tensão Rede e Corrente



Fonte: Autoral

Seguindo para penúltimo ajuste do ensaio, configurou-se o decréscimo da potência reversa, primeiramente configurando o tempo de início conforme Figura 18.

Figura 18 - Configuração do decréscimo da potência reversa

004	Decremento corrente reversa	5,25 s
-----	-----------------------------	--------

Fonte: Autoral

Ajustou-se assim o decréscimo de potência reversa para o ponto de equilíbrio entre GD e consumo. Este ponto se dá quando a potência gerada pela fonte do cliente é capaz de fornecer energia a todas as cargas interligadas no barramento de baixa tensão. Neste momento não há potência consumida da rede da concessionária. Os ajustes foram (Figura 19 e Figura 20):

a) Manteve-se a tensão de 127V;

b) Nos ajustes da corrente, foi iniciado com 1,00 A e decrementando a passos de 50mA com um angulo ajustado de 180° de defasagem até atingir 0,00 A.

Quanto ao ajuste de tensão do lado Trafo, manteve-se as configurações de 127V e 1.00° de defasagem.

Figura 19 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado Rede

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Rede	Módulos
Vb	V2_Rede	tIncr 250,0 ms
Vc	V3_Rede	
Ia	I1_Corrente	
Ib	I2_Corrente	
Ic	I3_Corrente	

Fonte: Autoral

Figura 20 - Configuração do CE-7012 para Tensão Rede e Corrente

Rampa

Tipo de Rampa: Módulos (Selecionado) | Direta | Pulsada

Tempo de Geração a Cada Incr.: 250,0 ms

Valores Iniciais

Ponto	Canal	Mod.	Ang.	Freq.
Va	V1_Rede	127,0 V	0 °	60,00 Hz
Vb	V2_Rede	127,0 V	-120,0 °	60,00 Hz
Vc	V3_Rede	127,0 V	120,0 °	60,00 Hz
Ia	I1_Corrente	1,00 A	180,0 °	60,00 Hz
Ib	I2_Corrente	1,00 A	60,00 °	60,00 Hz
Ic	I3_Corrente	1,00 A	300,0 °	60,00 Hz

Limites e Incrementações

	Limite	Incr.	d/dt	N Passos	Tempo
<input type="checkbox"/> Va					
<input type="checkbox"/> Vb					
<input type="checkbox"/> Vc					
<input checked="" type="checkbox"/> Ia	0 A	-50,00 mA	-200,0 mA/s	21,00	5,25 s
<input checked="" type="checkbox"/> Ib	0 A	-50,00 mA	-200,0 mA/s	21,00	5,25 s
<input checked="" type="checkbox"/> Ic	0 A	-50,00 mA	-200,0 mA/s	21,00	5,25 s

Reset

Saídas Binárias

Canal	Incr.

Saídas GOOSE

Canal	Incr.

Fechar

Fonte: Autoral

Na finalização do ensaio temos a retirada abrupta da fonte de GD e a volta da necessidade de suprimento de potência pela rede da concessionária para atender a demanda do consumidor. Neste momento é configurado o tempo para incremento da potência fornecida para o cliente (Figura 21) e a configuração das tensões e correntes do lado da Rede dos relês NetPro (Figura 22 e Figura 23):

- a) Alterou-se a tensão de REDE para 126V; e
- b) Nos ajustes da corrente, foi iniciado com 0,00 A e incrementando 50mA a cada passo com um anglo ajustado de 0° de defasagem até atingir 1,00 A (400A na IHM).

O ajuste de tensão do lado Trafo manteve-se com as configurações de 127V e 1.00° de defasagem.

Figura 21 - Configuração do incremento da potência fornecida ao cliente

005	corrente normal	5,25 s
-----	-----------------	--------

Fonte: Autoral

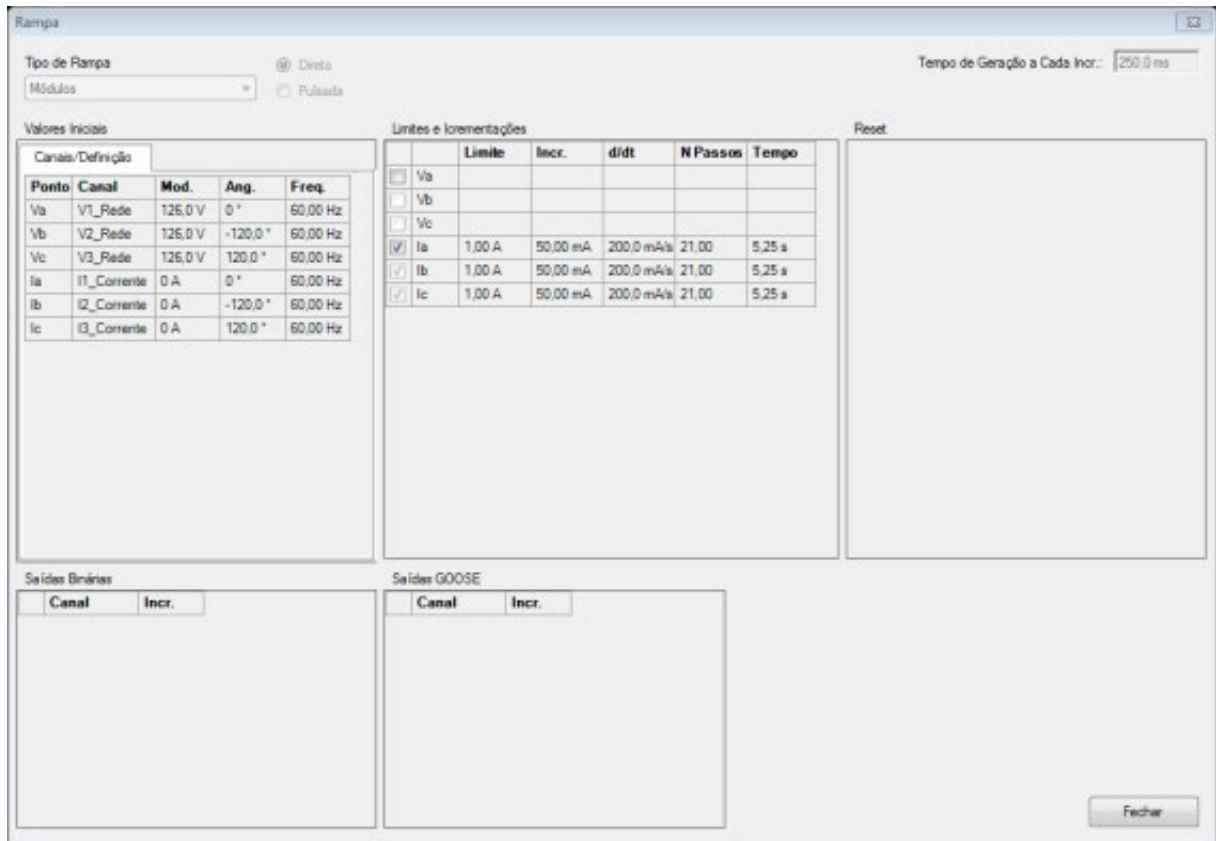
Figura 22 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado Rede

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Rede	Módulos
Vb	V2_Rede	tIncr 250,0 ms
Vc	V3_Rede	
Ia	I1_Corrente	
Ib	I2_Corrente	
Ic	I3_Corrente	

Fonte: Autoral

[Figura 23 abaixo]

Figura 23 - Configuração do CE-7012 para Tensão Rede e Corrente



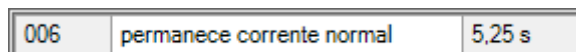
Fonte: Autoral

Para finalizar foi configurada a potência fornecida ao cliente que se mantém no nível inicial do ensaio. Configura-se o tempo de início (Figura 24) e após a tensão e corrente de rede (Figura 25 e Figura 26):

- Nos ajustes da tensão de REDE, iniciou-se a sequência com 126V, incrementando 50mV a cada passo até atingir 127V;
- Nos ajustes da corrente, manteve-se com 01A e um angulo ajustado de 0° de defasagem.

O ajuste de tensão do lado Trafo manteve-se com as configurações de 127V e 1.00° de defasagem.

Figura 24 - Configuração da potência fornecida ao cliente



Fonte: Autoral

Figura 25 - Configuração do CE-7012 para defasagem lado Rede

Canais/Definição		
Ponto	Canal	Definições
Va	V1_Red	Módulos
Vb	V2_Red	tIncr 250,0 ms
Vc	V3_Red	
Ia	I1_Corrente	
Ib	I2_Corrente	
Ic	I3_Corrente	

Fonte: Autoral

Figura 26 - Configuração do CE-7012 para Tensão Rede e Corrente

Rampa

Tipo de Rampa: Módulos (Direta / Pulsada) | Tempo de Geração a Cada Incr.: 250,0 ms

Valores Iniciais

Ponto	Canal	Mod.	Ang.	Freq.
Va	V1_Red	126,0 V	0 °	60,00 Hz
Vb	V2_Red	126,0 V	-120,0 °	60,00 Hz
Vc	V3_Red	126,0 V	120,0 °	60,00 Hz
Ia	I1_Corrente	1,00 A	0 °	60,00 Hz
Ib	I2_Corrente	1,00 A	-120,0 °	60,00 Hz
Ic	I3_Corrente	1,00 A	120,0 °	60,00 Hz

Limites e Incrimentações

	Limite	Incr.	d/dt	N Passos	Tempo
<input checked="" type="checkbox"/> Va	127,0 V	50,00 mV	200,0 mV/s	21,00	5,25 s
<input checked="" type="checkbox"/> Vb	127,0 V	50,00 mV	200,0 mV/s	21,00	5,25 s
<input checked="" type="checkbox"/> Vc	127,0 V	50,00 mV	200,0 mV/s	21,00	5,25 s
<input type="checkbox"/> Ia					
<input type="checkbox"/> Ib					
<input type="checkbox"/> Ic					

Reset

Saídas Binárias

Canal	Incr.

Saídas GOOSE

Canal	Incr.

Fechar

Fonte: Autoral

Finalizados todos os ajustes, passou-se às 3 (três) simulações, que cobrem as hipóteses de funcionamento da rede Spot na presença de GD.

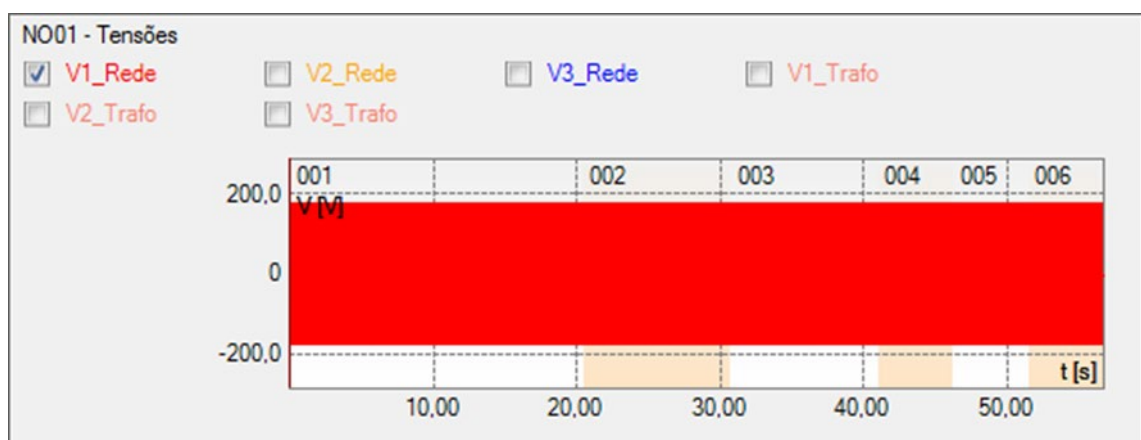
4.2. Primeira simulação: inserção GD sem limitação de potência pela concessionária

Para a primeira simulação, considerou-se a configuração dos equipamentos de proteção da rede de distribuição da NDB como atualmente utilizadas. Para tanto configurou-se o relé de proteção do protetor de redes com os seguintes parâmetros para potência reversa:

- a) Rele NetPro_01 – ajuste de 7,5 A de corrente reversa temporizada e 15A instantânea;
- b) Rele NetPro_02 – ajuste de 7,5 A de corrente reversa temporizada e 15A instantânea.

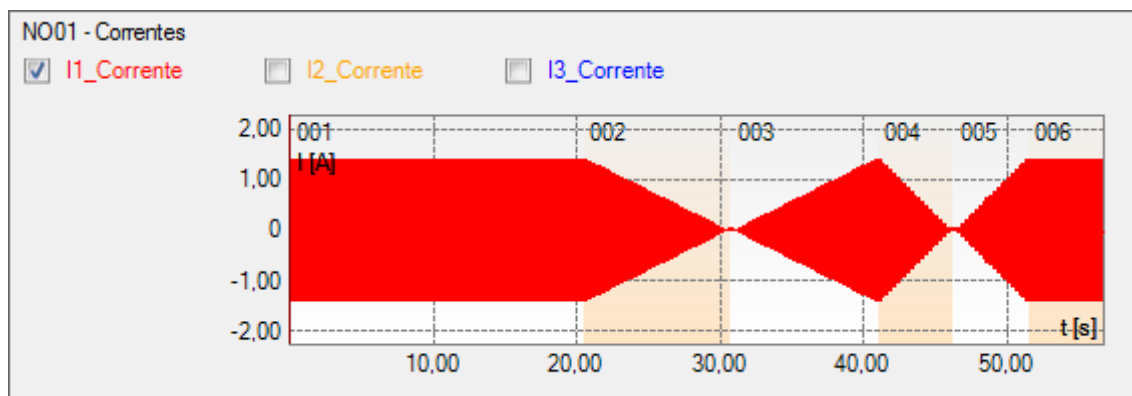
A configuração do testador CE-7012 realizada gerou as oscilografias de tensão e corrente conforme Figura 27 e Figura 28 respectivamente, injetados nos relés da giga de testes (fonte operando como testadora de relés). Ao mencionarmos os termos “rede da concessionária”, “geração secundária – GD” e “demanda do cliente”, foi no intuito de fazer um paralelo com a operação real da RDS. Obs.: com a base de tempo utilizada no gráfico, para mostrar-se o tempo total da simulação, as formas de onda senoidais formaram uma figura contínua, o que se justifica pela análise buscada de um período ampliado.

Figura 27 - Gráfico da tensão de rede da fase A injetada nos relés – 1ª simulação



Fonte: Autoral

Figura 28 - Gráfico da inserção de corrente da fase A injetada nos relés – 1ª simulação



Fonte: Autoral

Pela análise do gráfico de corrente da Figura 28 pode-se notar os pontos de inversão de potência da rede da concessionária, com demanda constante de carga por parte do cliente, que deu-se do seguinte modo:

- a) Potência constante consumida pela rede da concessionária (até aprox. 21 s);
- b) Decremento de potência consumida pela concessionária pela inserção da fonte secundária (fonte de GD) em rampa, entre 21s e 31s;
- c) A GD suplementa o consumo, caracterizando fluxo de potência reversa nos transformadores da concessionária (potência reversa aumenta de 31s até 41s e depois diminui até se equilibrar novamente, de 41s a 46s) – processos em rampa;
- d) Diminuição da potência da fonte secundária de GD, com aumento do suprimento da demanda do cliente pela rede da concessionária (de 46s a 52s, aprox.);
- e) Retorno do fornecimento pleno da demanda ao cliente pela rede da concessionária (após 52s).

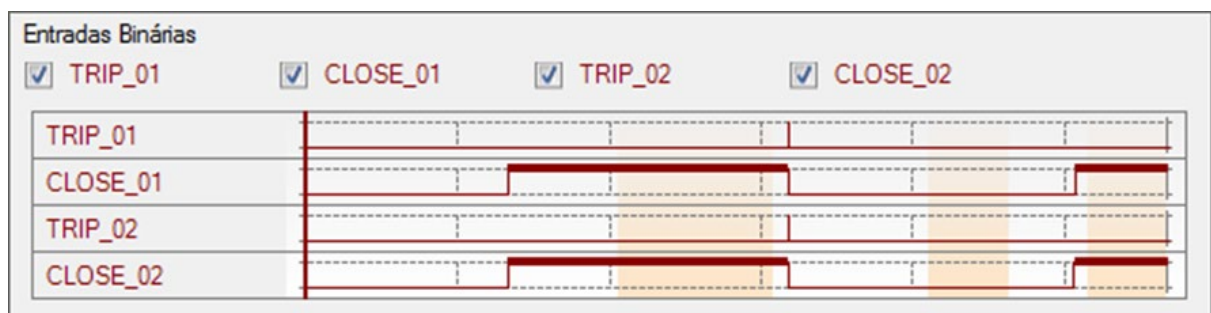
Aplicou-se estes parâmetros no setup do laboratório e foi possível observar o comportamento dos relés de proteção NetPro. Neste caso os dois relés, que inicialmente estavam abertos, fecharam para fornecimento de energia para os clientes.

Após a inserção da fonte secundária – de GD, em um dos clientes, a potência fornecida pela rede da concessionária começou a diminuir até o momento de equilíbrio, onde a potência gerada pela fonte secundária se iguala a potência consumida no barramento de baixa tensão. Após isto se inicia o aumento da potência da fonte de GD e parte da mesma retornando para a rede da concessionária. Neste momento a corrente se torna negativa nos relês, indicando potência reversa, e como a proteção está configurada para um limite de 15A de potência reversa instantânea, os dois relês dão comando de Trip para abertura.

A partir deste ponto a rede da concessionária está desligada dos clientes, podendo haver problemas de sincronização (houve aqui a reconstrução do efeito de ILHAMENTO, ou seja, a GD causou na rede um desligamento, isolando o cliente da rede da concessionária).

Após este ponto, se inicia o processo de diminuição da potência da fonte secundária, passando pelo ponto de equilíbrio e novamente requisitando potência da rede da concessionária. Neste momento os relês voltam a comandar uma operação de fechamento (reconexão do cliente à rede da concessionária). Neste caso, como utilizamos a mesma fonte de energia para caracterizar a rede da concessionária e a geração secundária GD do cliente, não tivemos problemas de sincronismo o que pode ocorrer em uma situação real de campo. A operação LIGA-DESLIGA-RELIGA dos relês pode ser analisada pela Figura 29.

Figura 29 - Monitoramento dos relês pelo sistema SCADA – 1ª Simulação.



Fonte: Autoral

Os momentos corretos das transições descritas podem ser observadas através da Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Tempos das operações dos relés NetPro utilizados na 1ª. Simulação

Transiente	TRIP_01	CLOSE_01	TRIP_02	CLOSE_02
001	↑ 31,75 s	↑ 13,29 s	↑ 31,76 s	↑ 13,28 s
002	↓ 31,80 s	↓ 31,75 s	↓ 31,79 s	↓ 31,77 s
003	---	↑ 50,68 s	---	↑ 50,65 s

Fonte: Autoral

A operação LIGA-DESLIGA-RELIGA dos relés dos protetores de rede indicadas na Figura 28 podem se repetir várias vezes, sequencialmente ou não (dependendo das condições de carga/GD), o que a norma IEEE para protetores de rede chama de pumping [22], que traz vários transtornos na qualidade de energia e pode vir a danificar os equipamentos protetores de rede da ET.

4.3. Segunda simulação: inserção GD com relé auto ajustado desconsiderando a GD para Trip

Nesta segunda simulação é adicionado ao sistema mostrado na simulação anterior o resultado de uma lógica de funcionamento dos relés do equipamento protetor de redes, que inclui a verificação dos fasores das correntes distribuídas aos consumidores em BT e o cômputo da soma fasorial destas. Este “saldo” entre Geração Distribuída x Consumo, que é computado por um concentrador de dados chamado Concentrador de GD (C-GD), está inserido na lógica do computador que simula a lógica de monitoramento e compensação de todas estas potências interligadas ao barramento de baixa tensão. Estas potências são monitoradas através do dispositivo Smart TC da Pronutec.

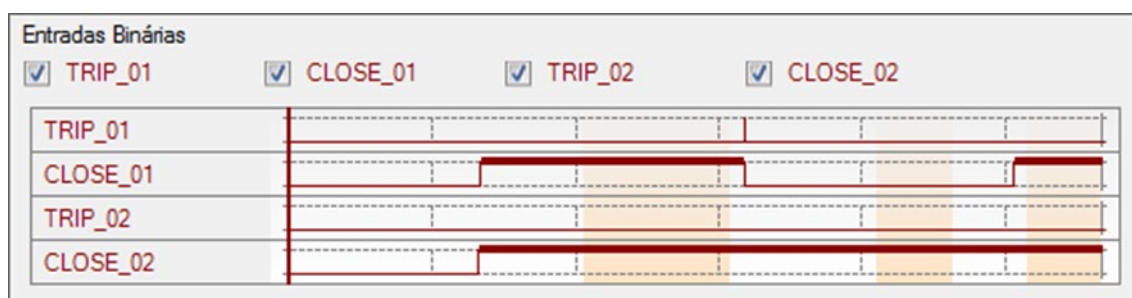
Para esta simulação utilizamos as mesmas configurações geradas pelo testador CE-7012 que geraram os sinais elétricos dos gráficos de tensão e corrente da simulação anterior.

Com isso é possível observar o comportamento dos 2 (dois) relés NetPro da configuração Spot Network através do registro digital de operação dos mesmos, vistos na Figura 30. A atuação do algoritmo de compensação da GD está presente no Relé 2 (chamado de relé Master),

que trabalha de forma adaptativa, “subindo” a regulação da corrente reversa (setup) à medida que ocorre a inserção de GD, vista no nó Kirchoff de correntes que é o CBT (e seus sensores Smart TC). Nele verificamos a atuação de ambos os relés 1 e 2, após a seguinte sequência de eventos na rede:

- a) Energização da RDS e inicialização dos relês;
- b) Comando de fechamento dos relés 1 e 2;
- c) Consumo de carga pelos clientes;
- d) Inicialização da fonte de GD;
- e) Diminuição da corrente nos relês;
- f) Ponto de equilíbrio;
- g) Reversão da potência vista nos relês: positiva para negativa;
- h) Ajuste contínuo do Relé 2 à medida que a GD aumenta, compensando o nível de potência reversa aceitável através do C-GD;
- i) Abertura do relé 1 que se encontra na configuração normal – ajuste de 15A;
- j) Relé 2 se mantém fechado: não gera Trip;
- k) Decremento da potência gerada pela fonte de GD;
- l) Aumento da potência consumida da rede da concessionária;
- m) Relé 1 volta enviar comando de fechamento.

Figura 30 - Monitoramento dos relês pelo sistema SCADA – 2ª. Simulação



Fonte: Autoral

As transições podem ser observadas através da Tabela 4 a seguir, que indica os tempos de operação dos relés 1 e 2.

Tabela 4 - Tempos das operações dos relés NetPro utilizados na 2ª. Simulação

Transiente	TRIP_01	CLOSE_01	TRIP_02	CLOSE_02
001	↑ 31,75 s	↑ 13,29 s	↑ 31,76 s	↑ 13,28 s
002	↓ 31,80 s	↓ 31,75 s	↓ 31,79 s	↓ 31,77 s
003	---	↑ 50,68 s	---	↑ 50,65 s

Fonte: Autoral

Através destes dados foi possível avaliar que o relé 2, que recebe os ajustes automáticos de setup da proteção via comunicação com o C-GD não operou Trip. Isso deveu-se ao fato de que o relé 2 foi programado através do C-GD com um nível, adicional e temporário, de aceitação para potência reversa – novo setup para corrente reversa. O ajuste do setup se dá a partir da soma vetorial de todas as potências geradas e consumidas no barramento de baixa tensão do CBT, informadas ao C-GD pelos Smart TC numa rede RS-485. Com essa somatória se tem o valor da potência cuja origem é de GD que irá retornar para a rede da concessionária, e assim o C-GD configura este novo setup do relé do protetor de redes para compensar a GD. Com isso, permite-se a operação da GD na rede de distribuição SPOT, pois haverá a relevância da IGD, que não é uma falha mas uma condição normal da rede de distribuição.

Não houve o efeito de Ilhamento, não permitido nas normas internacionais de inserção de GD [3] na rede de distribuição. Entretanto, grandes geradores (grandes geradores: projetos de geração distribuída aprovados na concessionária) podem inserir sistemas de proteção em seus inversores que não permitam a inserção de GD com ilhamento – desconexão da rede da concessionária; entretanto, podem questionar a concessionária por energia disponibilizada e não contabilizada, caso essas proteções atuem.

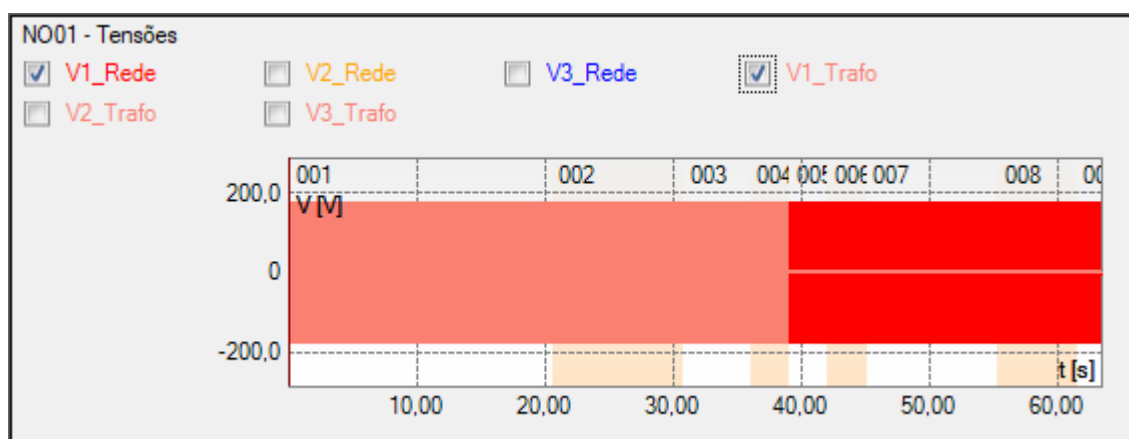
Mas quando pequenos geradores distribuídos, instalados de forma dispersa na rede e autorizados pela concessionária, possuem juntos uma potência considerável que pode fazer atuar a proteção dos protetores de rede, a concessionária atrai para si um problema de difícil solução (que é o que este projeto se propõe a solucionar).

4.4. Terceira simulação: falha na rede primária durante geração distribuída para acionamento da proteção convencional

Nesta nova simulação, adicionamos na lógica do testador compacto CE-7012 um evento na rede primária para que seja possível a operação da proteção do relé Netpro enquanto ocorre a situação da simulação 2 (anterior) – relé ajustado com setup maior para compensar a GD. Para tanto foi necessário realizar um novo setup no Testador CE-7012 para que fosse simulado tal evento em sua programação.

Para simular o evento (curto de alta impedância em um dos circuitos primários, por exemplo), realizou-se a configuração de uma corrente reversa superior a 15 A (que é o setup original dos relés dos protetores de rede para Trip instantâneo), de modo a permitir que houvesse sobreposição da corrente proveniente de Geração Distribuída com a corrente da falha no circuito primário, cujos gráficos de tensão e corrente referentes à simulação se apresentam conforme Figura 31 e Figura 32, respectivamente.

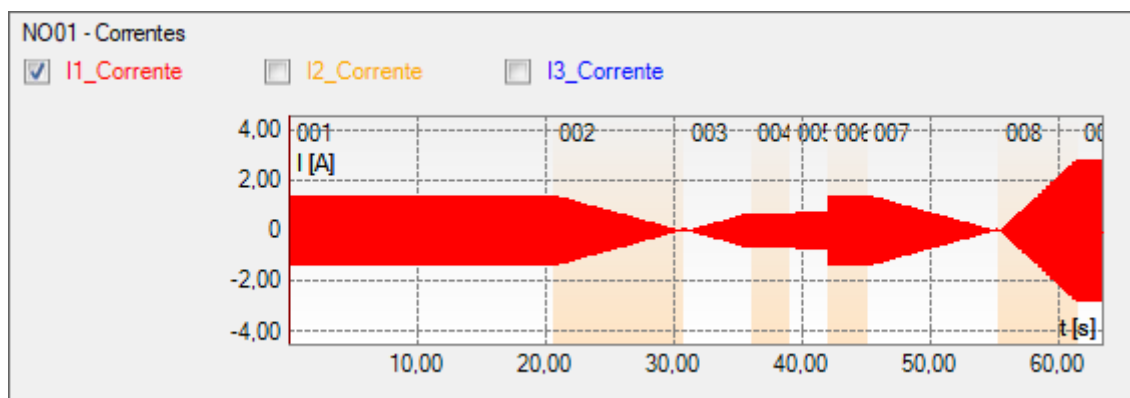
Figura 31 - Gráfico da tensão de rede da fase A injetada nos relés – 3ª. simulação



Fonte: Autoral

[Figura 32 abaixo]

Figura 32 - Gráfico da inserção de corrente da fase A injetada nos relés (considerar que o IHM do relé apresenta uma corrente proporcional à presença de um TC de 400:1)



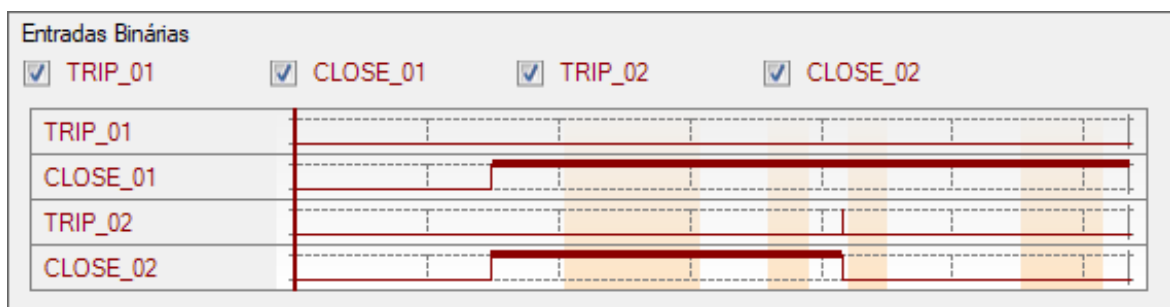
Fonte: Autoral

Com a injeção dos sinais que permitiram a simulação foi possível observar o comportamento de CLOSE-TRIP dos relés dos dois protetores de rede presentes na configuração Spot, apresentados na Figura 33. Tal comportamento “digital” (on-off) deveu-se ao seguinte processo de simulação:

- a) Inicialização dos relés;
- b) Fechamento dos relés 1 e 2 e início do consumo de carga;
- c) Inicialização de inserção de corrente pela fonte de Geração Distribuída;
- d) Diminuição até ser anulada a corrente nos relés (Rede da Concessionária);
- e) Reversão da corrente nos relés (injeção de GD na Rede da Concessionária);
- f) Ponto de máxima produção de GD, sem desarme dos relés devido a ajuste dinâmico do setup de potência reversa, através do C-GD – Concentrador de GD;
- g) Ponto de TRIP do relé 02, devido a falha no seu sistema primário de alimentação;
- h) Relé 01 se mantém ligado, evitando o ilhamento do consumidor e do sistema GD;
- i) Diminuição da corrente injetada da GD, diminuindo-se o retorno de corrente ao sistema da concessionária;

- j) Ponto de inflexão: o sistema da concessionária começa a fornecer corrente, para complementar a GD no suprimento da carga do consumidor (foi mantida carga constante de 800 A no consumidor durante toda a simulação);
- k) O sistema da concessionária suplanta a potência fornecida pela GD;
- l) O sistema da concessionária assume sozinho a potência fornecida ao consumidor.

Figura 33 - Monitoramento do estado ON-OFF (Close – Trip) dos relés pelo sistema SCADA – 3ª. Simulação



Fonte: Autoral

As transições da 3ª. Simulação podem ser observadas através da Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Tempos das operações dos relés NetPro utilizados na 3ª. Simulação

Trans	TRIP_01	CLOSE_01	TRIP_02	CLOSE_02
001	---	↑ 14,88 s	↑ 41,58 s	↑ 14,87 s
002	---	---	↓ 41,62 s	↓ 41,59 s

Fonte: Autoral

Nesta simulação foi possível observar o funcionamento da lógica do Controlador de GD, fazendo auto ajuste dos relés 01 e 02 de modo a não entrarem em Trip. O que ocorreu somente quando a potência reversa se deu não pela inserção de GD, mas pela falha no circuito primário 02, fazendo com que este delta de potência reversa, esta sim uma falha na rede de distribuição, viesse do alimentador 01. Note que este aumento súbito de potência reversa não veio da GD e sim da realimentação entre

os sistemas primários, devido ao paralelismo dos transformadores do sistema Spot Network analisado.

A proteção contra potência reversa foi acionada, mesmo na presença de ajuste de setup do Relé 2 pelo C-GD. Quando o Relé 2 recebe o setup do nível de potência que pode retornar à rede da concessionária devido à presença de GD, comunicação esta vinda do C-GD, seus parâmetros de corrente reversa se alteram, permitindo que o “saldo” de potência reversa existente no barramento de baixa tensão CBT retorne à rede da concessionária. E, na presença de um evento de falha que exceda a corrente de setup original, esta será de intensidade maior que a potência reversa permitida no Relé Netpro (15 amperes ajustado nos relés), permitindo abertura do protetor por Trip no Relé 2 e a proteção do sistema conforme originalmente concebido.

Note que a atualização do “saldo” de GD pelo C-GD nos relés dos protetores de rede deve ser constante, para que seus setups estejam atualizados quanto à GD que está sendo injetada e lida nos protetores de rede.

Nas figuras a seguir mostraremos em forma de slides (instantâneos tirados da filmagem da 3ª. simulação), que permitem uma confirmação visual da cadeia de eventos ocorrida.

Figura 34 - Inicialização: tensões de transformador e de rede gerados pelo Testador CE-7012: $t = 20$ s



Figura 35 - Fechamento do Protetor_01 e Protetor_02: corrente de carga dos consumidores da rede da concessionária na ordem de 800 A trifásico (aprox. 400A em cada um dos dois Protetores de Redes), correntes no display dos relés considerando-se TC de 400:1 injetadas diretamente nos relés 01 e 02 pelo Testador CE-7012: $t = 23$ s



Fonte: Autoral

Figura 36 - Efeito do aumento da corrente de Geração Distribuída - IGA, mantendo-se a carga dos consumidores constante em ~ 800 A, sendo verificada como decréscimo da corrente trifásica fornecida pelos transformadores da rede da concessionária - IRC, através dos Protetores 01 e 02, em 3 momentos distintos na simulação



a)

b)

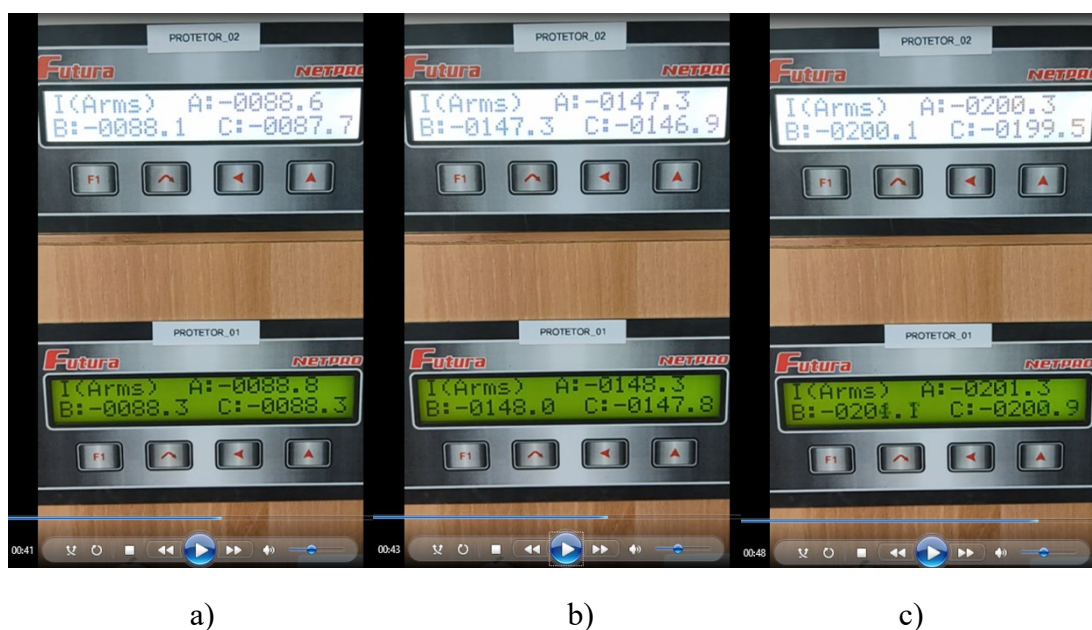
c)

Fonte: Autoral

Legenda da Figura 36:

- a) $I_{RC_01} \approx I_{RC_02} \approx 320$ A ($I_{GD} \approx 160$ A = 2×80 A = $2 \times (400 - 320)$) A, em $t = 00:31$ s;
 b) $I_{RC_01} \approx I_{RC_02} \approx 175$ A ($I_{GD} \approx 450$ A = 2×225 A = $2 \times (400 - 175)$) A, em $t = 00:34$ s;
 c) $I_{RC_01} \approx I_{RC_02} \approx 10$ A ($I_{GD} \approx 780$ A = 2×390 A = $2 \times (400 - 10)$) A, em $t = 00:38$ s.

Figura 37 - Efeito do aumento contínuo da corrente de Geração Distribuída - IGA, mantendo-se a carga dos consumidores constante em ~ 800 A, em 3 momentos distintos na emulação em que a potência da GD ultrapassa o consumo, provocando retorno de potência para a rede de distribuição da concessionária



Fonte: Autoral

Entretanto, na figura Figura 37, os relés dos Protetores 01 e 02, que originalmente estavam regulados para gerar TRIP com 15A de potência reversa, estão sendo dinamicamente ajustados para permitir que a rede da concessionária receba tal potência reversa proveniente da GD, conforme a legenda abaixo.

Legenda da Figura 37:

- a) $I_{RC_01} \approx I_{RC_02} \approx -88$ A ($I_{GD} \approx 976$ A = 2×488 A = $2 \times (400 - (-88))$) A, em $t = 00:41$ s;
 b) $I_{RC_01} \approx I_{RC_02} \approx -148$ A ($I_{GD} \approx 1096$ A = 2×548 A = $2 \times (400 - (-148))$) A, em $t = 00:43$ s;
 c) $I_{RC_01} \approx I_{RC_02} \approx -200$ A ($I_{GD} \approx 1200$ A = 2×600 A = $2 \times (400 - (-200))$) A, em $t = 00:48$ s.

Figura 38 - Momento no qual é emulada uma falha no primário do alimentador do Protetor_02 que provocou uma corrente reversa maior que os 15A do setup do relé, mantida e sem interrupção de uma GD de 400A trifásica



a)

b)

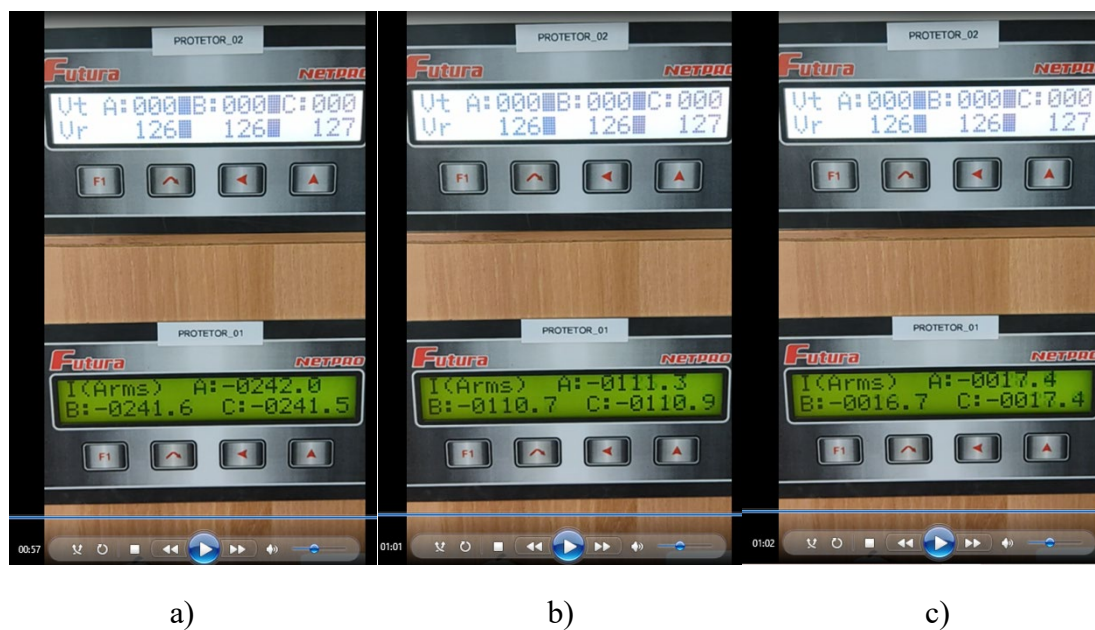
Fonte: Autoral

Na Figura 38, tivemos a seguinte sequência de eventos:

- a) Instante pré Trip do relé do Protetor_02, com correntes superiores aos 200A de GD mais corrente de falha no primário maior que 15A, situação conseguida pelo congelamento do vídeo em $t = 00:48s$;
- b) Instante pós Trip do relé do Protetor_02, que apresenta em seu display uma tensão normalizada $VREDE = 126 V$ retroalimentada pela tensão simulada do Transformador_01, e $VTRAFO = 0 V$, simulando o desarme do disjuntor do Alimentador_02 da Subestação de Potência. No relé do Protetor_01, temos a corrente reversa de aprox. 400 A, que duplicou ante a 200A da situação pré-Trip devido à abertura causada pelo relé do Protetor_01; $t = 00:53 s$.

Como observação, ressaltamos que, por termos disponível somente 1 canal de corrente, manteve-se o relé do Protetor_01 com ajuste de corrente reversa nominalmente maior que o relé do Protetor_02, de forma a forçar o desarme do Protetor_02.

Figura 39 - Sequencia pós Trip, no qual o relé do Protetor_02 mantém o mesmo na condição Aberto, em que a GD começa a diminuir conforme ajustes da simulação - ainda em potência reversa



Fonte: Autoral

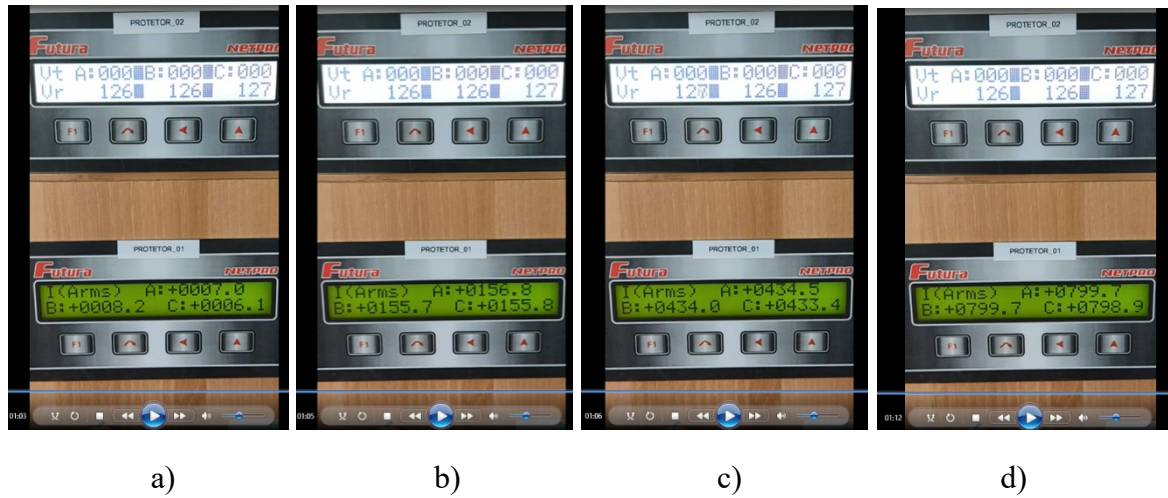
Legenda da Figura 39:

- a) $I_{RC}^{-}_01 \approx -240 \text{ A}$ ($I_{GD} \approx 1040 \text{ A} = (800 - (-240)) \text{ A}$, em $t = 00:57 \text{ s}$;
- b) $I_{RC}^{-}_01 \approx -110 \text{ A}$ ($I_{GD} \approx 910 \text{ A} = (800 - (-110)) \text{ A}$, em $t = 01:01 \text{ s}$;
- c) $I_{RC}^{-}_01 \approx -17 \text{ A}$ ($I_{GD} \approx 817 \text{ A} = (800 - (-17)) \text{ A}$, em $t = 01:02 \text{ s}$.

Na Figura 39 nota-se a diminuição da injeção de corrente reversa na rede da concessionária, mantido o consumo de 800A trifásico pelos consumidores da concessionária, conforme legenda.

[Figura 40 abaixo]

Figura 40 - Sequencia pós Trip no qual o relé do Protetor_02 mantém o mesmo na condição Aberto, e que a GD continua a diminuir conforme programado na simulação com conseqüente compensação de potência injetada pela concessionária



Fonte: Autoral

Na Figura 40, aumenta-se a injeção de corrente direta pela rede da concessionária, mantido o consumo de 800A trifásico pelos consumidores da concessionária:

- a) $I_{RC^-}_{01} \approx 7 \text{ A}$ ($I_{GD} \approx 793 \text{ A} = (800 - 7) \text{ A}$, em $t = 01:03 \text{ s}$;
- b) $I_{RC^-}_{01} \approx 156 \text{ A}$ ($I_{GD} \approx 644 \text{ A} = (800 - 156) \text{ A}$, em $t = 01:05 \text{ s}$;
- c) $I_{RC^-}_{01} \approx 434 \text{ A}$ ($I_{GD} \approx 366 \text{ A} = (800 - 434) \text{ A}$, em $t = 01:06 \text{ s}$;
- d) $I_{RC^-}_{01} \approx 800 \text{ A}$ ($I_{GD} = 0 \text{ A} = (800 - 800) \text{ A}$, em $t = 01:12 \text{ s}$).

[Figura 41 abaixo]

Figura 41 - Momento final da simulação do processo, mantida a carga constante do cliente em 800A trifásico, sem a injeção de Geração Distribuída na rede da concessionária e sem o retorno da tensão no alimentador primário no. 2: $t = 1:19$ s

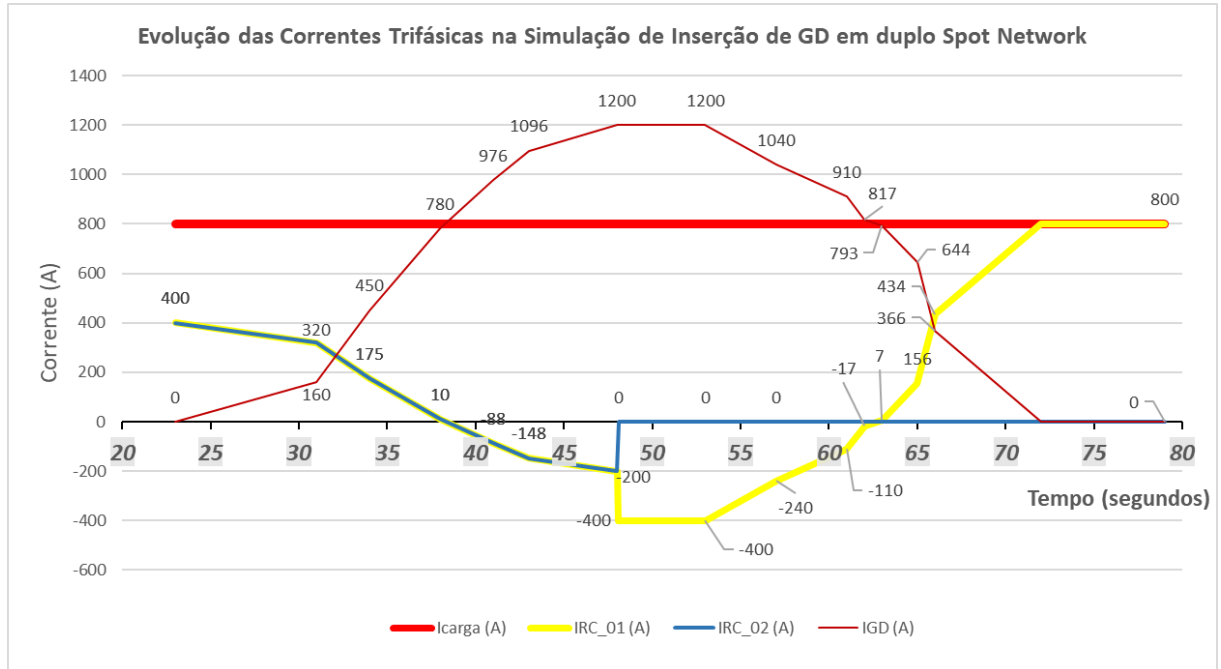


Fonte: Autoral

No gráfico a seguir da Figura 42, temos o comportamento das correntes trifásicas equilibradas das duas Redes da Concessionária (IRC) no sistema Spot Network de dois transformadores, frente à inserção de geração distribuída (IGD) e com carga (ICARGA) constante de 800 A: não houve distúrbio no processo de geração distribuída (interrupção do fornecimento) como ilhamento (isolamento do consumidor frente à rede da concessionária) pelo desligamento do sistema Spot Network ou qualquer transitório de ABRE-FECHA-ABRE nos protetores de rede.

[Figura 42 abaixo]

Figura 42 - Comportamento das correntes trifásicas equilibradas das duas Redes da Concessionária (IRC) no sistema Spot Network de dois transformadores, frente à inserção de geração distribuída (IGD) e com carga (ICARGA) constante de 800 A



Fonte: Autoral

5. DESCRIÇÃO DE DESENVOLVIMENTO DO C-GD

Os equipamentos desenvolvidos no projeto pertencem a um Sistema de Retrofit que permitem a operação do equipamento Protetor de Redes na presença de Geração Distribuída, sem a necessidade de a concessionária limitar a geração para que não haja retorno de potência à sua rede de distribuição.

Destaca-se que não foi detectado na literatura internacional, equipamento que solucionou este impasse de ligação de GD junto com sistema reticulado, sem que houvesse algum tipo de restrição ao consumidor/gerador, quer seja de limitação da potência instalada em sua GD, quer seja de implantação de sistemas complexos que não permitem, em hipótese alguma, que haja qualquer tipo de retorno de energia gerada por GD à rede da concessionária. Mesmo assim, grandes produtores centralizados conseguem instalar estes bloqueadores de retorno porque têm central única de gestão, o que não ocorre quando existem vários pequenos geradores, mas que, num efeito conjunto, podem causar os efeitos descritos de ilhação, desarmes e pumping no sistema reticulado e nos protetores de rede.

O Sistema de Retrofit é composto por equipamentos desenvolvidos, juntamente com equipamentos adquiridos ao longo do projeto, quais sejam: transformador de corrente com comunicação, fonte repetidora de sinal RS485, relé de proteção do protetor de redes e o Controlador de GD.

5.1. Funcionamento do sistema de retrofit proposto

O sistema de retrofit proposto tem entre seus elementos principais o C-GD, um equipamento microprocessado desenvolvido para ser instalado no equipamento Protetor de Redes, em substituição à IHM atual. Faz a gestão das cargas dos consumidores e do nível de geração distribuída fluindo nas várias saídas do(s) painel(is) de distribuição de baixa tensão CBT acoplados aos transformadores de distribuição.

A partir da análise, ciclo a ciclo do pooling da rede RS485 (aprox. 0,2 segundo por CBT), envia comandos por protocolo serial de ajuste de setup do relé do equipamento Protetor de Redes, de forma a que o mesmo não mais interprete a energia que está retornando ao Sistema de Distribuição devido à GD como uma falha. Além disso, não interfere no setup de ajuste dos relés do Protetor de Redes para proteção de falhas por potência reversa, ajuste este estabelecido por condições de projeto pela Concessionária de Distribuição de Energia Elétrica. Ou seja, mantém as características de proteção previamente ajustadas para falhas desse Sistema de Distribuição, ao qual foi concebido e ajustado, e ao mesmo tempo permite que a energia proveniente da GD possa fluir do elemento gerador (quer seja gerador fotovoltaico, eólico ou a combustível) à rede da Concessionária, permitindo a convivência entre ambos ao fazer a distinção entre falha e a GD, que não é falha.

Para o pleno funcionamento do sistema, ele depende da instalação, nos painéis de baixa tensão acoplados aos transformadores de distribuição da rede de distribuição do tipo Reticulado Dedicado (Spot Network), de sensores de corrente trifásicos, ligados a cada saída deste painel, e que tenham comunicação pelo protocolo serial RS-485, formando uma rede local de comunicação RS-485.

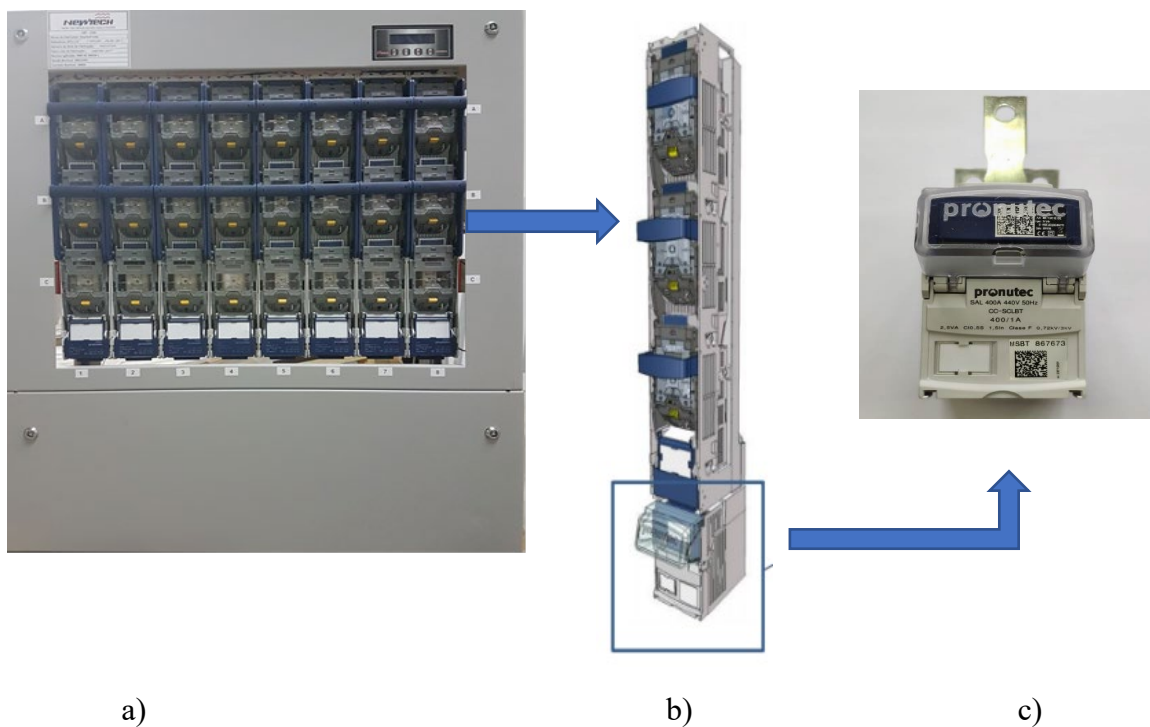
À rede de comunicação RS-485 que interliga os sensores de corrente estará também conectado o Gestor de GD, que fará a leitura por comunicação digital das variáveis dos fasores (valores de amplitude e fase) de tensão e corrente de cada uma das fases das saídas aos consumidores e/ou GD. Através de algoritmo exclusivo, desenvolvido e instalado na memória interna do Gestor de GD, será avaliado o nível de GD presente nos painéis de baixa tensão, permitindo atribuir valores às variáveis de setup que serão transmitidas aos relés dos protetores de rede via comunicação RS-485, ajustando a cada ciclo seu setup.

5.2. Transformador de corrente com Comunicação para os painéis de distribuição

O transformador de corrente TC com comunicação RS-485, de fabricação da empresa Pronutec (Espanha), é compatível com as características do quadro de distribuição de baixa tensão CBT da NDB, com protocolo de comunicação aberto de modo que possam ser extraídas informações de geração distribuída.

A Figura 43 mostra o TC da Pronutec e o local onde é instalado no CBT da NDB.

Figura 43 - Quadro de baixa tensão CBT, composto por 8 rúguas de fusíveis NH-2 / 400A, cujo TC Pronutec pode ser inserido como acessório para medidas de grandezas elétricas e comunicação RS-485: a) CBT; b) régua NH-2 tripolar; c) TC Pronutec.



Fonte: Autoral

5.3. Fonte repetidora de sinal digital 485 com redundância

A fonte repetidora de sinal digital 485 com redundância, desenvolvida para o projeto, é um recurso tecnológico de comunicação a ser instalado

quando as distâncias dentro das ET fizerem com que a qualidade do sinal comprometa a comunicação entre o C-GD e os TCs. Possui duas fontes de 24 Vcc independentes e duas redes RS-485 também independentes, de modo a fazer um anel de comunicação 485 e aumentar a confiabilidade da rede de comunicação. A C-GD dará um alarme quando uma das redes 485 não funcionar (embora a outra continue funcionando), para eventual manutenção corretiva.

Figura 44 – Fonte de alimentação com dupla alimentação, com repetidor 485 embutido, a ser utilizada no projeto como repetidor/amplificador do sinal 485: a) vista interna; b) com case de instalação.



a)

b)

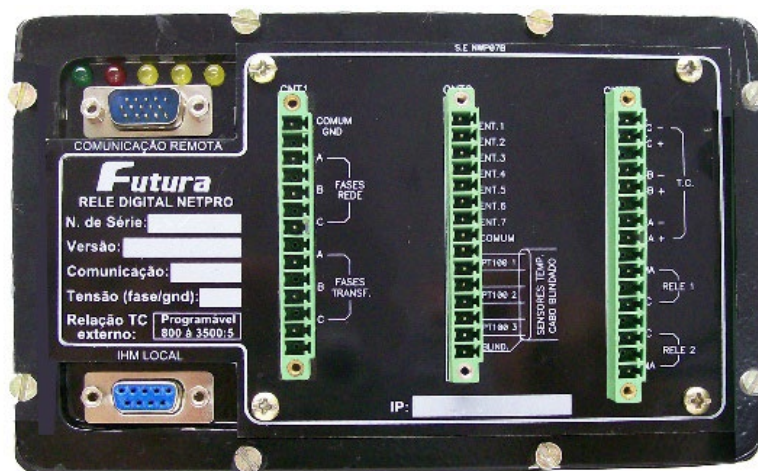
Fonte: Autoral

5.4. Relé de proteção para protetores de rede

O relé de proteção para protetores de rede utilizado, de fabricação da Futura Engenharia, se comunica com o equipamento denominado Controlador de GD (C-GD) de rede Spot (descrito a seguir), de modo a fornecer informações da rede Spot e receber atualizações dinâmicas em seu setup. Assim, permite a distinção de geração distribuída e falha na rede de distribuição, quando houver, atuando deste modo somente em momentos de falha na rede;

[Figura 45 abaixo]

Figura 3 – Relé do equipamento Protetor de Redes, que atua em modo de setup dinâmico de proteção, para distinção de GD e falha na rede de distribuição.



Fonte: Autoral

5.5. Controlador de GD de Sistema de Distribuição do tipo Reticulado dedicado (SPOT Network)

O equipamento denominado “Controlador de GD de Sistema de Distribuição do tipo Reticulado dedicado (SPOT Network)”, mais resumidamente Controlador de GD de Rede Spot, se comunica com relé da Futura e TC da Pronutec, faz os cálculos para estabelecimento do nível de GD que está sendo inserido na rede, e atribui dinamicamente valores de setup de potência reversa ao relé do protetor de redes.

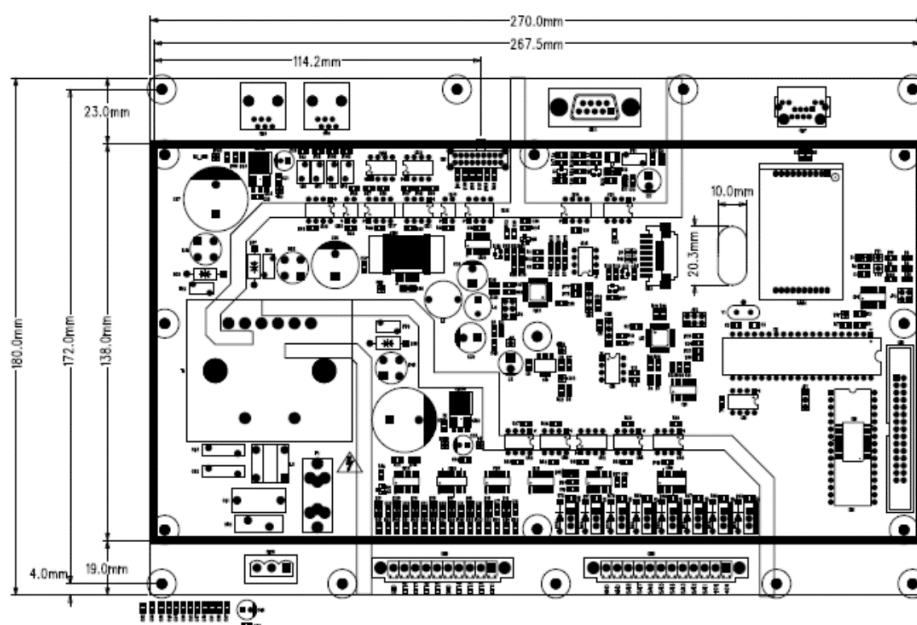
Deste modo, faz-se a distinção de geração distribuída e falha na rede de distribuição de forma dinâmica, além de verificar status de redundância das comunicações e seleção dos equipamentos que devem operar como mestres e outros como escravos nesta rede.

O C-GD de Rede Spot é um equipamento que moderniza o Protetor de Redes e que pode ser instalado pela concessionária dentro deste para solução do problema de limitação de potência instalada de GD, alternativa que vem sendo amplamente utilizada para contornar a situação. Este C-GD de Rede Spot é constituído das seguintes partes:

- a) Placa eletrônica micro processada, modelo V80H, com fonte, memórias e conexões de entradas e saídas digitais e analógicas, desenvolvida com exclusividade e para as necessidades a que se

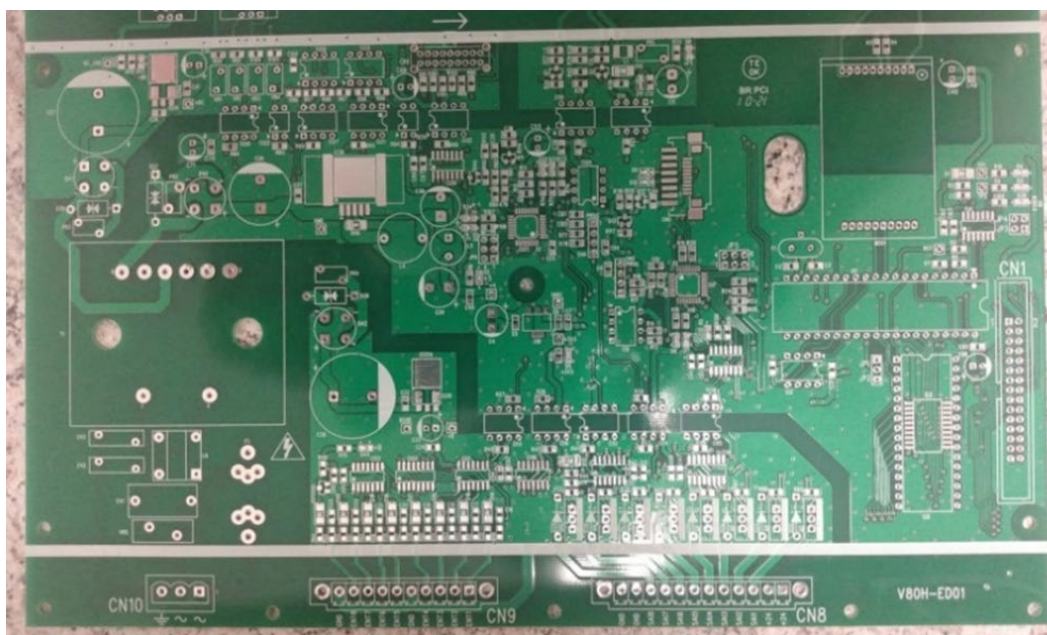
destina, e que abriga um firmware também dedicado e exclusivo que fica gravado em uma memória não volátil, conforme Figura 46, Figura 47 e Figura 48.

Figura 4 – Fitolito da placa micro processada modelo V-80H



Fonte: Autoral

Figura 5 – Placa PCB modelo V-80H, montada com componentes



Fonte: Autoral

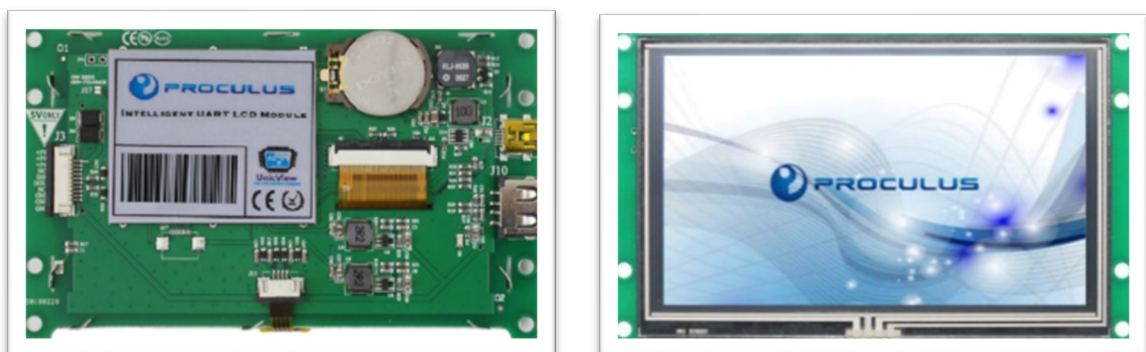
Figura 6 – Placa PCB modelo V-80H, montada com componentes



Fonte: Autoral

- b) IHM: foi adquirido um display LCM Inteligente de 7" para conexão com a placa V80H, permitindo fazer a interface entre o operador e programação/monitoramento dentro das ETs.

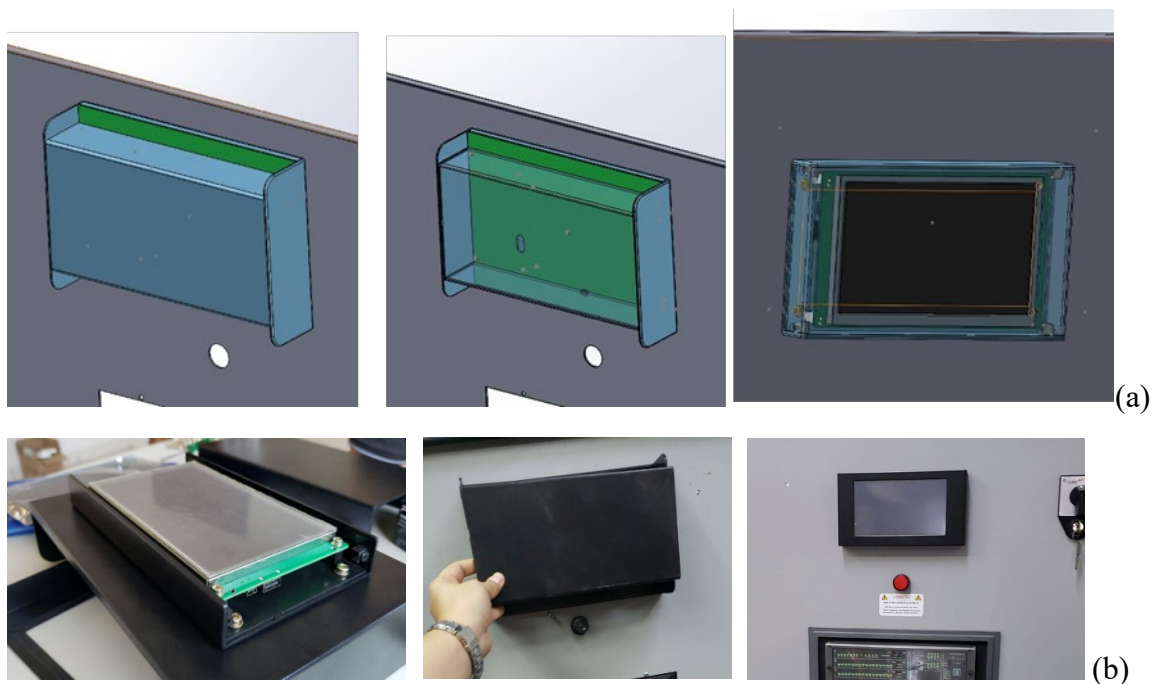
Figura 49 – Display LCM colorido 7" utilizado para interface de programação e monitoramento dentro das ETs da concessionária.



Fonte: Autoral

- c) Estrutura de fixação termoplástica, que abriga a placa eletrônica micro processada descrita acima e permite a inclusão de um display do tipo touch screen para ajuste de setup do relé do protetor de redes (ajuste através de porta de comunicação serial).

Figura 50 – Estrutura para fixação da placa eletrônica micro processada V80H: a) Desenho para fabricação; b) peça manufaturada e montagem final no protetor de redes.



Fonte: Autoral

5.6. Firmware Da Placa V80H

A placa V80H, mostrada na figura Figura 78, é onde fica a CPU do Controlador de GD (C-GD). Nela fica o microcontrolador e memórias RAM e ROM, de modo que o firmware desenvolvido para o projeto fica nela armazenada. Os códigos firmware foram disponibilizados para a NDB ao final do projeto.

O firmware da placa V80H faz as seguintes ações:

- a) Comunicação em pooling com os TC Pronutec instalados em uma rede de comunicação 485, de modo a fazer leituras de tensão, corrente, ângulo de defasagem, temperatura e alarmes de cada um destes TCs;
- b) Cálculos vetoriais da resultante das correntes das saídas dos TCs, que podem incluir potências reversas em uma ou mais fases, de um ou mais TCs;
- c) Comunicação com o relé do Protetor de Redes, : o relé recebe via comunicação serial o setup de corrente reversa que deve passar a

operar (que inclui um offset de potência reversa introduzido na rede pela geração distribuída) de modo a indicar qual é o nível de GD presente naquele momento na ET, para que o relé do protetor de redes possa compensar este valor (é um valor de potência reversa que será desconsiderado, pois não se trata de uma falha na rede de distribuição);

- d) Atuar como IHM, via tela colorida de 7" touch screen, com o técnico da concessionária:
- Atendendo aos comandos de programação do relé do protetor de redes através de uma tela idêntica à tela utilizada na versão anterior de IHM (antes do retrofit);
 - Disponibilizando dados de medição de tensão, corrente, potência, temperaturas, não só do protetor de redes mas do CBT e cada um dos seus circuitos de saída.

5.6.1 Firmware Da Placa V80H – emulação da IHM existente

Para comunicação com o display pela placa V80H, foram montados 4 5 arquivos em linguagem Assembly, cujos códigos fontes são:

- a) V80HA00.ASM;
- b) V80HB00.ASM;
- c) V80HC00.ASM;
- d) V80HM00.ASM;
- e) V80H_00.ASM.

A programação e compilação destes arquivos permitiram fazer a emulação da IHM do relé do protetor de redes instalado originalmente na área piloto, de modo que, ao se fazer o retrofit instalando o conjunto placa V80H + display colorido 7" (C-GD), o técnico responsável pelas operações do equipamento nas ETs da NDB não notará qualquer diferença com relação à programação dos equipamentos existentes previamente, às quais já está habituado e treinado.

Figura 51 – Telas de IHM: a) proposta de emulação da IHM existente; b) IHM existente.



Fonte: Autoral

A seguir são mostradas algumas telas programadas, que fazem parte do arcabouço de programação do C-GD, na parte do menu de emulação do IHM do relé digital do equipamento protetor de redes instalado na ET Spot Network da área piloto do projeto de P&D.

Figura 52 – Tela do C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: tela de inicialização.



Fonte: Autoral

[Figura 53 abaixo]

Figura 53 – Tela do C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: tela de tensões de transformador e de rede (protetor de redes aberto).



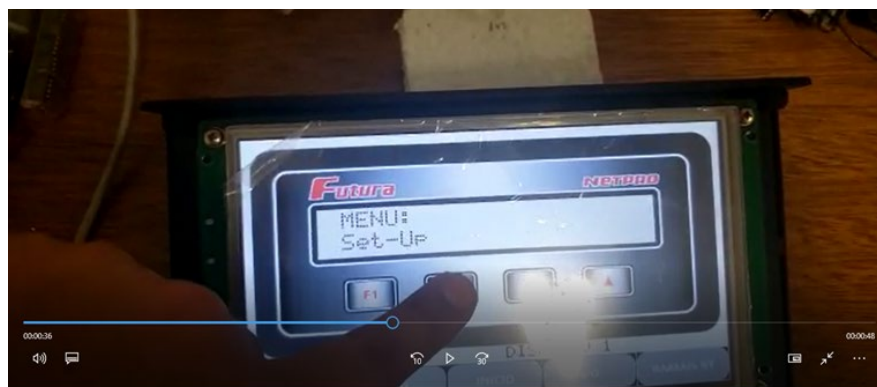
Fonte: Autoral

Figura 54 – C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: tela de data e hora.



Fonte: Autoral

Figura 55 – C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: tela de entrada de ajustes de SETUP do relé.



Fonte: Autoral

Figura 56 – Tela do C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: tela de entrada de ajustes de SETUP do relé – indicação da corrente nominal do transformador do Spot.



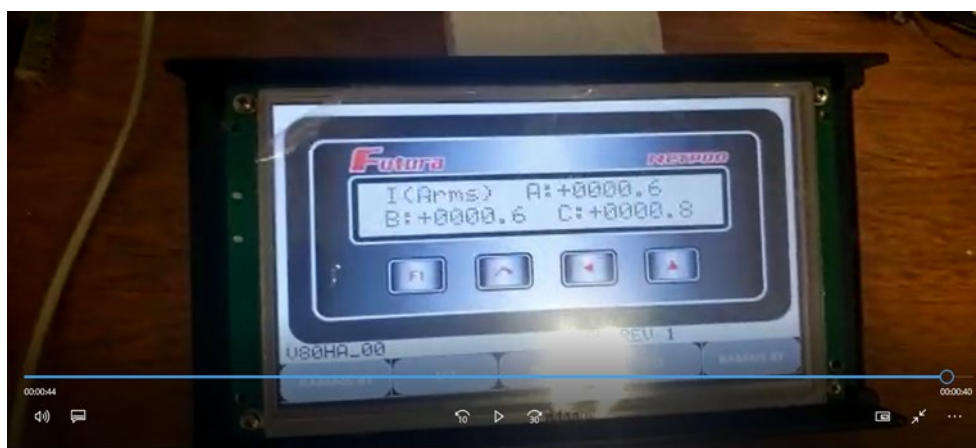
Fonte: Autoral

Figura 57 – Tela do C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: tela de entrada de ajustes de SETUP do relé – ajuste de trip da corrente instantânea em potência reversa.



Fonte: Autoral

Figura 58 – Tela do C-GD (placa V80H + display 7”) emulando tela do relé de proteção do equipamento Protetor de Redes: display com correntes trifásicas do respectivo transformador ao qual o protetor de redes está acoplado - protetor de redes fechado

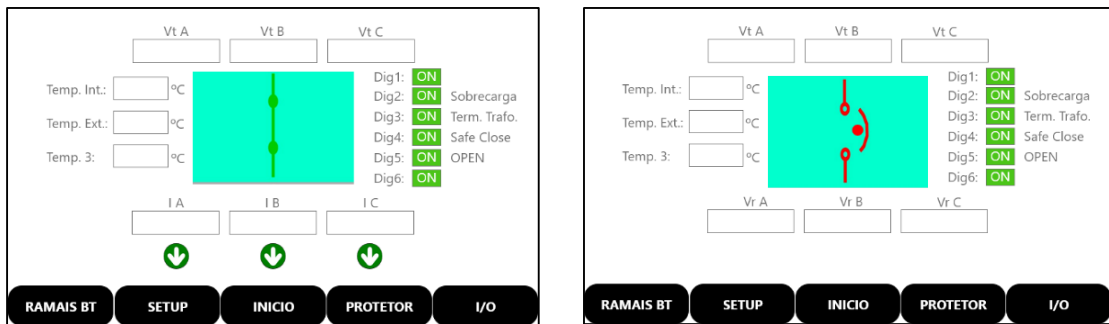


Fonte: Autoral

O arcabouço de programação do C-GD inclui ainda as telas indicativas de Geração Distribuída (monitoramento local na ET). Na barra inferior do display TOUCH SCREEN, o técnico pode alternar entre os MENUS do C-GD que incluem:

- a) Tecla INICIO: apresenta as seguintes variáveis do relé em uma única tela, a saber, tensões, correntes, fatores de potência, temperaturas e status (open – close) do protetor.

Figura 59 – Telas do menu INICIO do C-GD: tensões, correntes, temperaturas, digitais e status do protetor de redes (a: fechado; b: aberto).



a)

b)

Fonte: Autoral

- b) Tecla PROTETOR: tela de controle (emulação) do relé do protetor de redes;

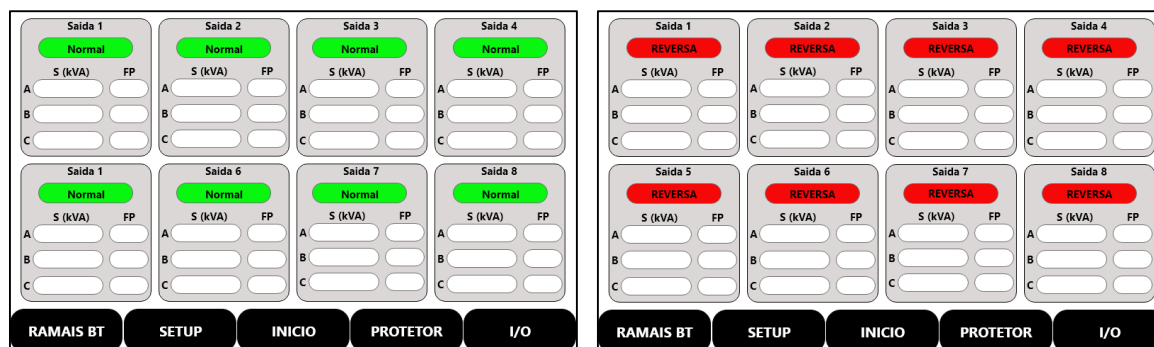
Figura 60 – Telas do menu PROTETOR: emula as funções do relé atual do Protetor de Redes.



Fonte: Autoral

- c) Tecla RAMAIS BT: tela de dados de corrente de carga (ou GD) de cada uma das saídas das régua de fusíveis NH-2 do equipamento CBT, presentes em todas as subestações da NDB;

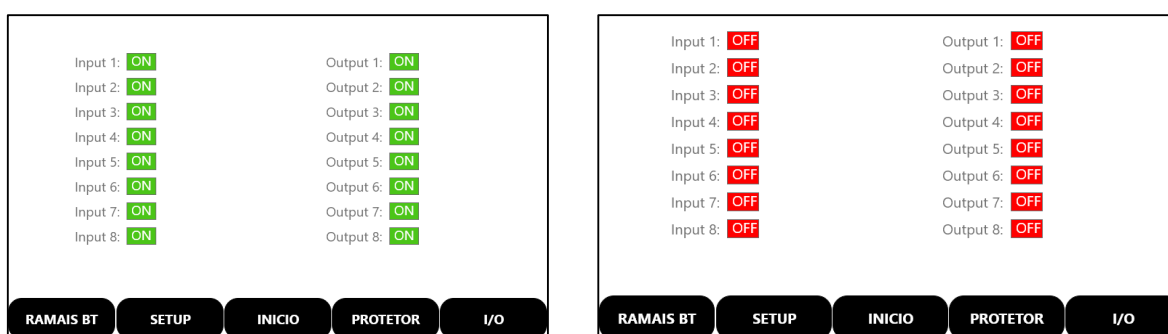
Figura 61 – Telas do menu RAMAIS BT: apresenta potência e fator de potência e fluxo de potência por código de cor (verde: fluxo direto ao consumidor; vermelho: fluxo reverso do consumidor “GD”).



Fonte: Autoral

- d) Tela I/O: display com status das 8 entradas e 8 saídas digitais presentes no hardware do C-GD

Figura 62 – Telas do menu I/O: apresenta status das 8 entradas e 8 saídas digitais presentes no hardware do C-GD (disponíveis para várias aplicações por parte da concessionária).



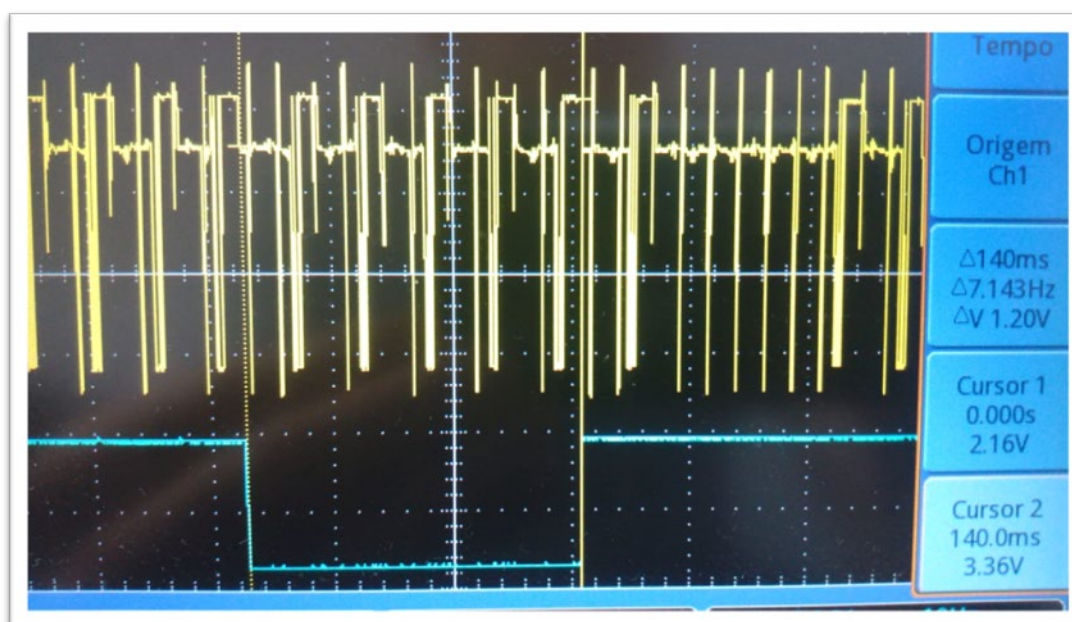
Fonte: Autoral

5.6.2 Firmware Da Placa V80H – estabelecimento do nível de GD da ET

O estabelecimento do nível de GD da ET, quer seja ET Spot Network ou ET do Primário Seletivo, é necessário para monitoramento e, no caso

do Spot, ajuste dinâmico do setup do relé de proteção. Este estabelecimento se dá de forma contínua através de pooling de comunicação com os TC através da rede 485. A Figura 63 mostra um teste de comunicação 485, com o trem de pulsos da rede 485, com ciclos de pergunta-resposta, para um conjunto de 5 TCs ligados na rede. O tempo medido para 5 TCs foi de aproximadamente 140 ms. Para um CBT com 8 TCs, o ciclo de pooling será de aprox. 225 ms.

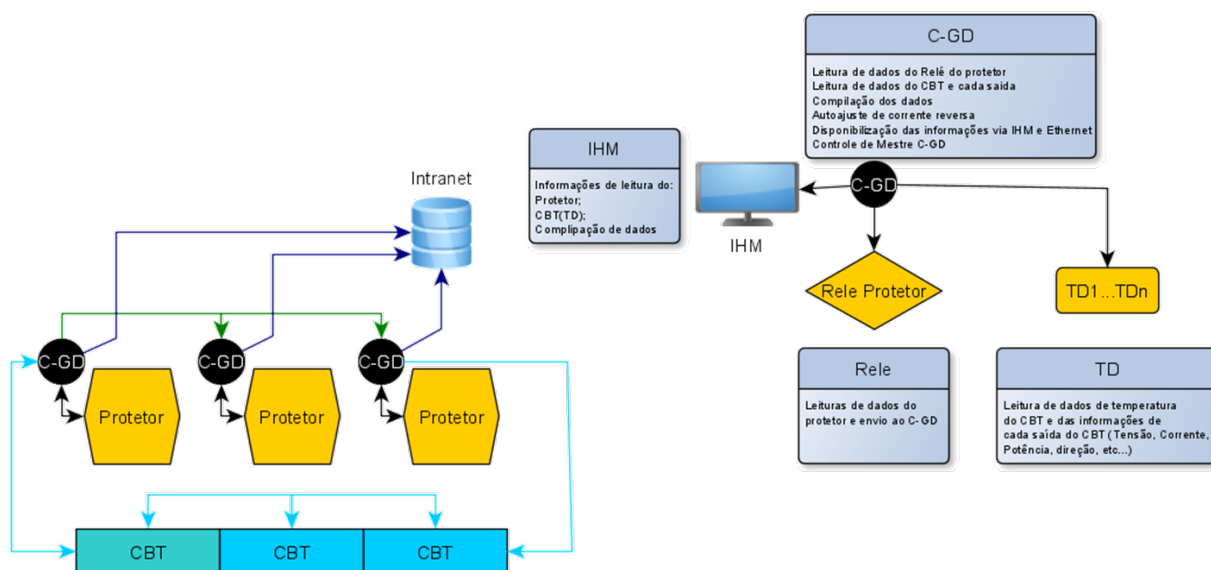
Figura 63 – Trem de pulsos de comunicação entre C-GD e TCs da rede 485 e avaliação do tempo de pooling.



Fonte: Autoral

Para o estabelecimento de forma contínua do nível de GD da ET e dinamicamente se manter atualizado o ajuste de setup do relé do protetor de redes, o firmware da placa V80H faz a varredura em pooling de todos os TC ligados na ET. A Figura 64 mostra o diagrama de ligações na qual o C-GD faz a leituras de todos os TCs da ET, o tratamento matemático, a disponibilização dos dados no IHM e ajuste dinâmico do setup do relé de proteção do Protetor de Redes.

Figura 64 – Diagrama de ligação do Controlador de GD de Rede Spot: ação local na ET na leitura dos TCs, cálculo contínuo da GD, ajuste dinâmico do Relé do Protetor e interação com IHM local.



Fonte: Autoral

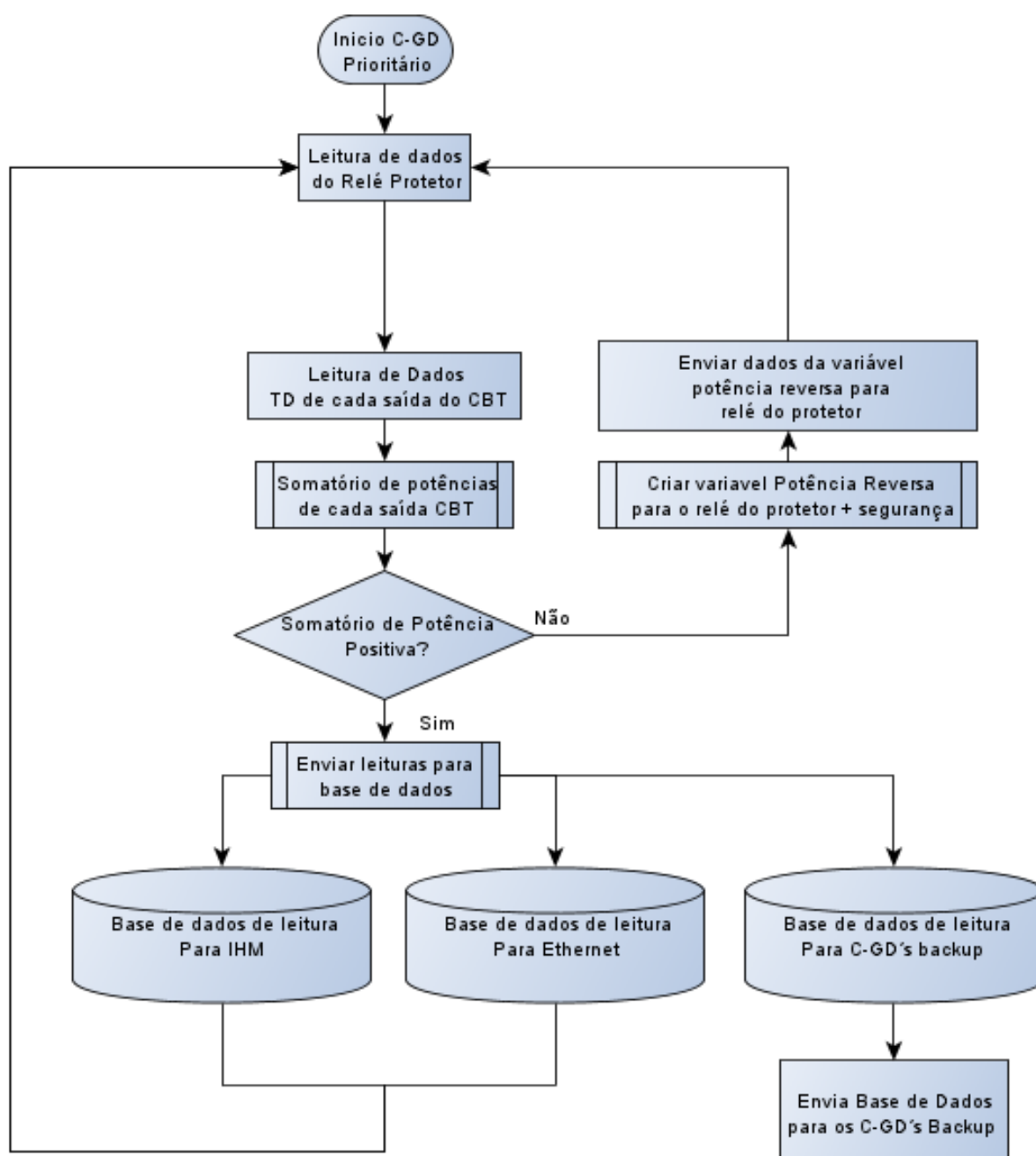
O algoritmo de tratamento dos dados pelo firmware V80H, quando ligado em ET Spot Network, se dá do seguinte modo:

- a) Leitura de dados do relé do protetor;
- b) Leitura de dados de todos os TCs de saída de carga para clientes da ET;
- c) Soma vetorial das correntes dos TCs de saída;
 - Caso haja GD, atualiza-se o valor da variável de setup do relé do protetor;
 - Caso não haja GD, volta a variável de setup do relé do protetor para o valor programado pelo técnico da concessionária.
- d) Disponibiliza os dados para IHM local e para comunicação externa.

A Figura 65 e Figura 66 apresenta o algoritmo básico de funcionamento do firmware V80H para ET Spot.

[Figura 65 abaixo]

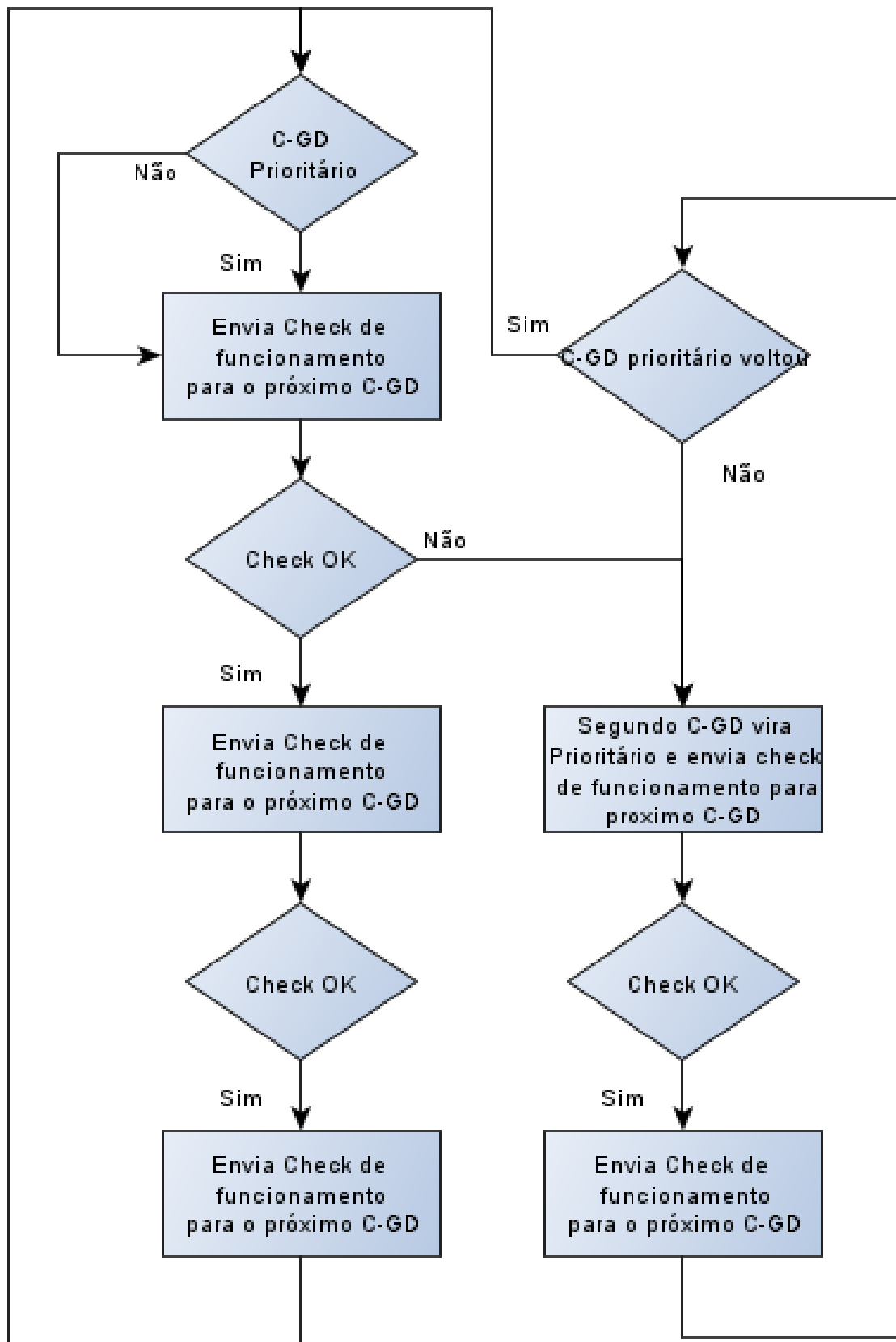
Figura 65 – Algoritmo básico do firmware do C-GD para sistema Spot Network implantado na placa V80H parte 1.



Fonte: Autoral

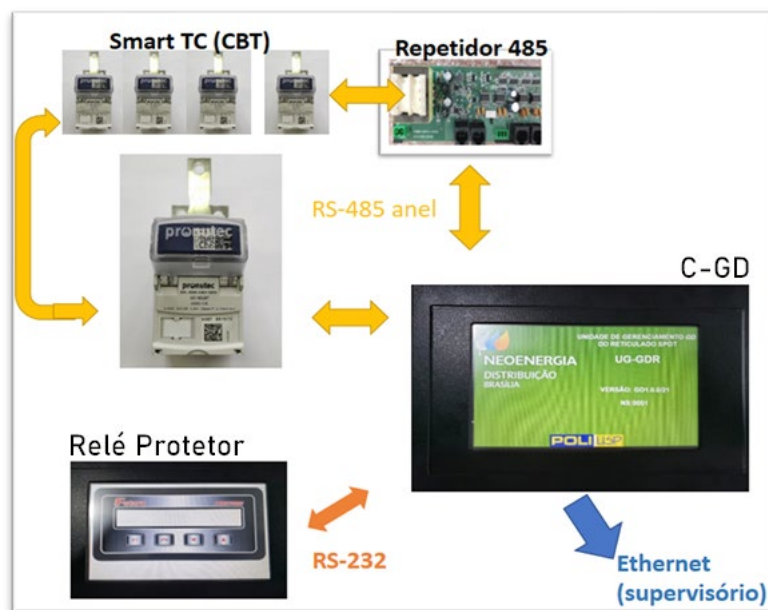
[Figura 66 abaixo]

Figura 66 – Algoritmo básico do firmware do C-GD para sistema Spot Network implantado na placa V80H parte 2.



Na Figura 67 temos o diagrama esquemático de comunicação entre os equipamentos da ET Spot Network, onde o C-GD faz o controle do fluxo de potência reversa que pode passar pelo Protetor de Redes, baseado nas leituras dos TCs do CBT (chamados também de Smart TC).

Figura 67 – Estrutura de comunicação local na ET Spot Network.



Fonte: Autoral

5.7. Considerações sobre a estrutura de hardware, software e firmware desenvolvida/implantada

Considerando que a programação do firmware da placa V80H permite tanto a emulação das funções do protetor pela IHM antiga, quanto a inclusão de novos parâmetros de monitoramento da GD da ET, além de fazer automaticamente o setup dinâmico dos ajustes de potência reversa do relé do protetor de redes, temos um equipamento com grau de complexidade suficiente para que a empresa contratante do projeto de P&D se interessasse pela patente do mesmo. Inclusive pelo fato de não haver similar nem nacional nem em outros países, especificamente nos EUA onde as redes de distribuição subterrâneas reticuladas são amplamente difundidas pelo seu alto grau de confiabilidade, como já foi dito, o que requereu na pesquisa um elevado grau de análises para

obtenção de um produto adequado às necessidades da concessionária NDB.

6. TESTES DA METODOLOGIA, PLATAFORMA COMPUTACIONAL E/OU PROTÓTIPOS DE EQUIPAMENTOS

6.1. Descrição do pacote tecnológico desenvolvido

A ET Spot da área piloto apresenta 2 transformadores de distribuição da rede subterrânea da NDB de 500 kVA (primário 13,8 kV ligação triângulo, secundário 380/220 Vca ligação estrela aterrada). O paralelismo dos transformadores com circuitos primários distintos permite grande disponibilidade da rede de distribuição, pois em caso de falta em um dos circuitos, o outro assume toda a carga, sendo que o protetor de redes é o elemento de proteção para a potência reversa que surge quando o circuito com defeito, que era fonte, se torna carga para o outro circuito.

A ligação de geração distribuída na rede de distribuição Spot Network, onde naturalmente estariam as cargas dos consumidores pode ocasionar, no período do dia em que a potência de consumo dos clientes for menor que a potência injetada pela GD, um retorno de energia para a rede. A potência referente a este retorno de energia, que é variável, é chamada de potência reversa, e naturalmente sensibiliza os relés dos protetores de rede ao adentrar em sua zona de proteção. Entretanto, esta potência reversa proveniente da GD não é uma falha do tipo que o relé do protetor de redes foi projetado para operar (falha no alimentador primário ou mesmo no próprio transformador ao qual está conectado), mas sim uma situação esperada, pois esta GD foi inclusive autorizada (deveria ter sido) pela concessionária.

O desafio foi criar um mecanismo em que o protetor de redes consiga distinguir a potência reversa proveniente da GD como não sendo uma falha. O “mecanismo” desenvolvido neste projeto de pesquisa aplicada é um dispositivo eletrônico chamado Controlador de GD (C-GD) cujo funcionamento está calcado em:

- a) Ler as correntes de cada uma das saídas do quadro geral de baixa tensão da ET, cuja sigla para o sistema subterrâneo da NDB é CBT;

- b) As saídas do CBT são chaves verticais tripolares para fusíveis NH-2 (até 400 A), às quais foram anexados transformadores de corrente (TC) com perfeita conexão às chaves verticais tripolares;
- c) Esses TC têm leitura de grandezas analógicas da rede, como tensão, corrente, ângulo, e disponibiliza os dados via porta serial RS485, TCs que chamamos de Smart TC;
- d) A empresa fabricante dos Smart TC desenvolveu o produto para utilização no projeto de pesquisa, às suas custas, de modo a atender as necessidades de leituras e comunicação estudadas no decorrer do projeto pelos pesquisadores, tornando-a empresa parceira do projeto de pesquisa.

O C-GD é um computador dedicado (com hardware e software instalado numa motherboard e periférico display colorido touch screen) desenvolvido no projeto para atender as necessidades de leitura dos Smart TC via rede RS485 e comunicação com o relé do protetor de redes, operando do seguinte modo:

- a) Leitura dos Smart TC em pooling de aprox. 0,2 s por CBT (ver capítulo 5);
- b) Cálculos da corrente resultante nos ramais de saída do CBT;
- c) Disponibilização ao relé do protetor de redes pela serial RS232 o resultado compilado de todas as leituras, comunicação esta feita de modo dinâmico ao término do pooling;
- d) O relé do protetor de redes recebeu uma atualização de firmware para utilização dos dados proveniente do C-GD, também uma parceria tecnológica do fabricante incorporada ao projeto de pesquisa, como no caso dos Smart TC.

Como atividade secundária do projeto, criou-se um ambiente onde o C-GD pudesse operar com vários ganhos para a concessionária:

- a) Fazer parte de um pacote tecnológico de retrofit da ET Spot Network para facilitar sua instalação e permitir à NDB ter praticamente um produto cabeça de série para continuidade do projeto;

- b) Trazer em sua bagagem tecnológica uma situação de manutenção da cultura de operação/manutenção, de modo a manter todas as telas de ajustes aos quais os técnicos estão habituados a trabalhar (além obviamente dos avanços tecnológicos citados).

Já o pacote tecnológico de retrofit descrito acima procurou ter o mínimo de interferência e minimizar custos de aquisição e instalação junto aos equipamentos da ET. Para aplicação do conceito proposto / solução tecnológica, o retrofit proposto é composto das seguintes partes:

- a) C-GD, projeto de hardware/software/periférico projetado para instalação na porta do protetor de redes, no local do IHM ali existente e utilizando o mesmo local de fixação e a mesma porta serial RS232 existente;
- b) Chicote de ligação até o disjuntor de distribuição para alimentação dos circuitos eletrônicos do C-GD;
- c) Smart TC, desenvolvido para utilizar o espaço existente no CBT, de modo a não haver necessidade de outro painel geral de distribuição na ET;
- d) Fonte repetidora para a rede de comunicação RS-485, instalada no trilho padrão DIN existente dentro do protetor de redes.

Ou seja, um pacote tecnológico considerável pelos resultados e ineditismo com recursos otimizados para a concessionária.

6.2. Testes selecionados para avaliação da funcionalidade do sistema desenvolvido

Os testes necessários à comprovação da funcionalidade do sistema desenvolvido foram selecionados de modo a registrar o perfeito convívio entre GD e ET do tipo Spot Network, cujo efeito maior a ser verificado é o de não ilhamento do cliente consumidor/gerador da concessionária de distribuição. Este efeito de ilhamento causa processos de pumping e

suspensões temporárias e intermitentes do fornecimento de energia aos clientes, já descritos.

6.2.1. Funcionamento do sistema desenvolvido na condição de não reconhecimento de GD

Com a instalação do C-GD no Protetor de Redes instalado na área piloto no lugar do IHM existente, conforme pode ser verificado na figura a seguir, foi importante verificar primeiramente sua não interferência na funcionalidade normal do relé do protetor.

Figura 68 – Controlador de GD (C-GD) instalado no local do IHM do protetor de redes, conectado ao relé de proteção por comunicação serial RS232



Fonte: Autoral

Para tanto, mantivemos desconectada a comunicação RS485 do C-GD com os Smart TC, não permitindo que houvessem leituras de correntes de GD.

Foram 3 testes:

- a) Operação normal como IHM, permitindo programar e ler dados, sem carga;
- b) Operação com carga em potência positiva no protetor de redes, sem interferência nas proteções do relé (trip não esperado);
- c) Operação com carga em potência negativa no protetor de redes, sem interferência nas proteções do relé (trip esperado). Neste caso repetiu-se os problemas de suspensão do fornecimento / ilhamento com a presença de GD.

Isto comprovaria o funcionamento do sistema desenvolvido sem interferir na operação, digamos, natural do protetor de redes, que é abrir o circuito na presença de potência reversa, não importa a origem (no caso a origem é a GD proveniente de uma UFV instalada na área piloto). Comprovaria também o funcionamento do novo IHM, cuja operação teve o intuito de repetir e manter os procedimentos aos quais os técnicos da concessionária estavam habituados.

Chamamos estes testes iniciais de “Funcionamento do sistema desenvolvido na condição de não reconhecimento de GD”.

Com o sistema desenvolvido devidamente instalado, mas sem a comunicação entre o C-GD e os Smart TC via cabos da rede RS485, os ensaios se deram então através do monitoramento do funcionamento da ET da área piloto desde que a UFV. Os 3 testes podem ser resumidos na Tabela 6 a seguir.

[Tabela 6 abaixo]

Tabela 6 – Ensaio de funcionamento do sistema desenvolvido na condição de não reconhecimento de GD.

Ensaio	Condição	Verificação a ser observada	Resultado
Ensaio 1	C-GD instalado no Protetor de Redes operando como IHM: - sem rede de comunicação RS485 com Smart TC; - com comunicação RS232 com o relé do Protetor de Redes	As funções de programação de IHM devem estar preservadas	O C-GD foi capaz de fazer medições da rede elétrica e programar a IHM normalmente.
Ensaio 2		Com carga e potência positiva (6 lâmpadas de 400 W), as funções de IHM devem estar preservadas e não há interferência na operação do relé do Protetor de Redes	O C-GD foi capaz de fazer medições da rede elétrica e programar a IHM normalmente, não interferindo na operação do relé do protetor (não dando trip indesejado).
Ensaio 3		Com carga e potência negativa (UFV em operação), as funções de IHM devem estar preservadas e não há interferência na operação do relé do Protetor de Redes	O C-GD foi capaz de fazer medições da rede elétrica e programar a IHM normalmente, não interferindo na operação do relé do protetor, que desarmou o Protetor de Redes ao atingir a corrente de potência reversa ajustada no seu setup.

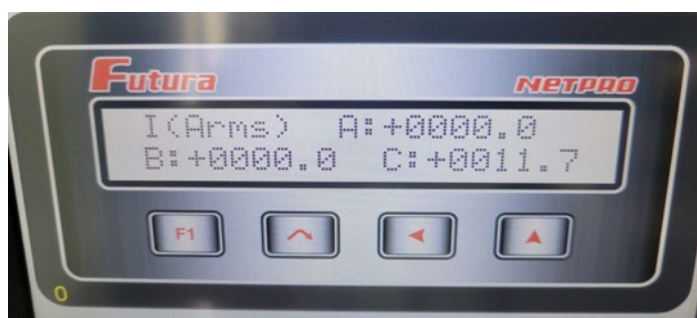
Fonte: Autoral

Os testes foram realizados na faixa de operação dos ajustes do relé de proteção feitos pela concessionária (7,5 A no ajuste temporizado e 15 A no ajuste instantâneo para potência reversa) de modo que a UFV, cujo valor máximo de corrente de projeto de 22 A, no caso reversa através do protetor de redes, foi suficiente para fazer atuar a proteção do mesmo. A UFV simulou uma rede de distribuição sob falha, ao injetar potência reversa no protetor de redes. A operação foi normal, tanto no modo temporizado como instantâneo.

Nas figuras a seguir temos as situações de: a) potência direta com carga de 6 lâmpadas de descarga de 400 W cada onde não houve interferência do C-GD no relé do Protetor de Redes; b) potência reversa (no instante a UFV estava produzindo 13,1 A), onde o relé operou pela proteção temporizada (10 segundos) e não pelo instantâneo. Também foi

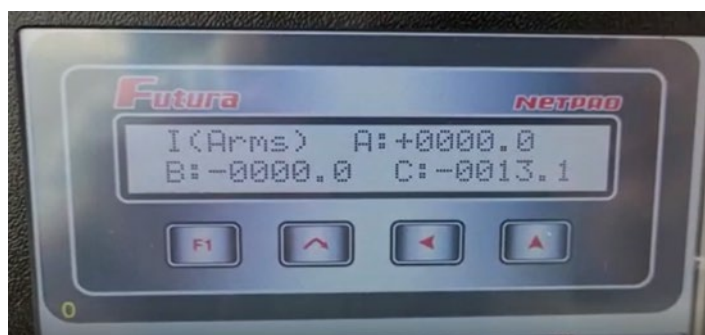
verificado o trip por I instantâneo ao ajustarmos valores menores no setup do relé do protetor (a geração da UFV estava estável em aproximadamente -13 A; como os ajustes da NDB para relé de protetores de rede são de -7,5A temporizado em 10 segundos e -15A instantâneo, com a geração de -13A pela UFV o trip ocorreu pelo temporizado; após, ao ajustarmos o instantâneo do relé de -15A para -10 A, o trip ocorreu pelo instantâneo, como esperado).

Figura 69 – Display do C-GD emulando a IHM do protetor de redes, com potência direta (2400 W).



Fonte: Autoral

Figura 70 – Display do C-GD emulando a IHM do protetor de redes, com potência reversa (trip por potência reversa temporizada ocorreu a seguir).



Fonte: Autoral

6.2.2. Funcionamento do sistema desenvolvido na condição de reconhecimento de GD

Uma vez mostrando-se funcional o sistema tanto na parte de ajustes de setup como na condição de desligamento em potência reversa, passou-se então aos testes operacionais do sistema desenvolvido na condição desafiadora: o reconhecimento da GD pelo protetor de redes como não sendo mais uma falha do sistema, mas uma situação prevista na rede de distribuição.

6.2.2.1. Princípio de funcionamento: Equação Geral Do Nó Kirchoff “CBT”:

O quadro de distribuição de baixa tensão da ET, o CBT, pode ser considerado como um nó de correntes, um nó Kirchoff, onde a somatória vetorial de todas as correntes entrantes no nó é nula, conforme a 1ª Lei de Kirchoff, chamada de Lei dos Nós. Ou de outro modo, as correntes provenientes dos transformadores da ET somada à corrente de GD é igual ao consumo instantâneo no momento analisado. A equação (1) apresenta a equação do Nó Kirchoff visto no CBT, premissa de análise do funcionamento da GD e da proteção dinâmica proposta no projeto de pesquisa.

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 + \vec{I}_{GD} = \vec{I}_C \quad (1)$$

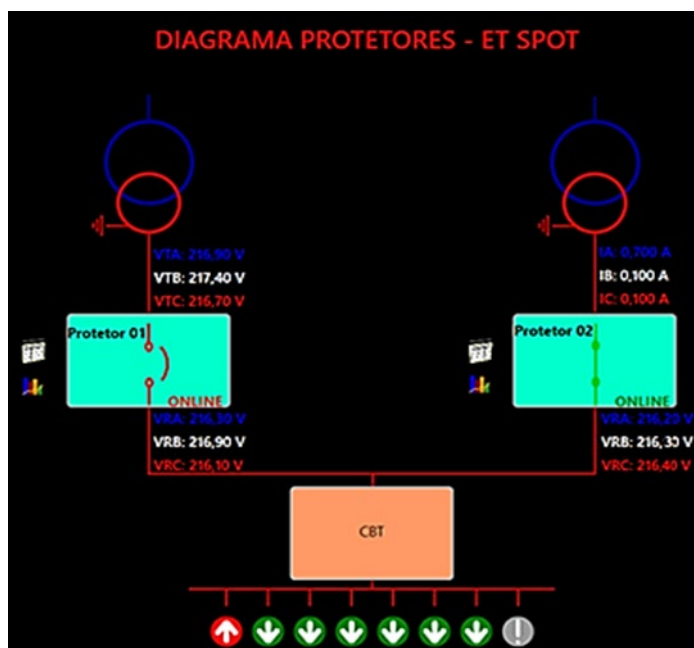
Na equação (1) acima, temos os seguintes índices para as correntes do nó (as correntes que entram e saem do CBT):

- a) \vec{I}_N : onde N se refere às correntes provenientes do 1º. ao 3º. Protetor de Redes (3º. Protetor de Redes onde existir o 3º. transformador);
- b) GD: ramal do CBT com inserção de GD (podendo ter cargas e GD no mesmo ramal);
- c) C: ramal do CBT apenas com consumo.

Obs: num ramal de saída do CBT que contenha tanto GD como cargas, somente o saldo entre GD e consumo retornará à rede através do CBT.

A equação (1) pode ser simplificada então quando no ramo coexistirem GD e Consumo, sendo que o vetor de corrente seria a composição entre geração e consumo que aparece no Nó Kirchoff CBT podendo ser visualizado no diagrama unifilar da figura a seguir.

Figura 71 – Diagrama unifilar da ET do Spot Network montada na área piloto, mostrando o CBT como Nó Kirchoff entre fonte (protetores 1 e 2 e respectivos transformadores) e GD/cargas (8 saídas indicadas no diagrama).



Fonte: Autoral

A equação (2) indica a equação geral do Nó Kirchoff CBT.

$$\sum_{n=1}^3 \overrightarrow{I_{SPOT\ n}} = \sum_{n=1}^n \overrightarrow{I_{CBT\ n}} \quad (2)$$

Na equação (2) acima, temos os seguintes índices:

- a) $I_{SPOT\ n}$: corrente nos protetores de rede da rede Spot, com n variando de 1 a 3 (quando não houver o 3º transformador, sua corrente pode ser considerada nula);

- b) I_{CBTn} : corrente em cada um dos n ramais do(s) CBT(s), podendo haver mais de um CBT acoplado um ao outro em paralelismo para aumento do número de ramais de saída.
- c) Os testes finais, portanto, foram no sentido da variação das correntes presentes na equação geral do Nó Kirchoff CBT indicado na equação (2). Para tanto, utilizou-se cargas em 4 ramais de saída do CBT da ET da área piloto e uma UFV ligada em 1 ramal deste mesmo CBT, com as seguintes potências nominais (visualizadas na figura a seguir):
- d) Cargas conectadas em 4 saídas do CBT: 2 lâmpadas de vapor de mercúrio de 400 W cada, ligadas em cada uma das saídas (saídas: chaves-fusível NH-2 vertical tripolar);
- e) UFV conectada em 1 saída do CBT: 18 placas de 330 Wp (total aprox. 6 kWp), sendo a geração de energia variável conforme condições climáticas e horário do dia.

Figura 72 – Cargas (lâmpadas de descarga de 400W), fonte GD (UFV) conectados ao CBT, retrofitado com Smart TC; elementos instalados na área piloto para testes finais do projeto de pesquisa.



Fonte: Autoral

6.2.2.2. Testes operacionais de funcionamento do C-GD no sistema desenvolvido na condição de reconhecimento de GD

Os testes conclusivos foram em dois sentidos. A) operar o Protetor de Redes na presença de GD por um período pré-determinado, de modo que as variações de potência da UFV (devido aos fatores climáticos e horário) não causassem atuação da proteção e portanto o desarme do Protetor de Redes; B) no sentido da manipulação das cargas presentes nas saídas do CBT, com possibilidade de variações de potência de carga e de GD proveniente da UFV pela abertura/fechamento dos circuitos de saída, e verificar o comportamento do protetor de redes na presença dessa potência reversa passando pelo seu circuito principal, mas agora com degraus de carga.

Pelo fato dos ajustes de setup da concessionária para potência reversa serem de 7,5 A no ajuste temporizado de 10 segundos e 15 A no ajuste instantâneo, não necessitamos de cargas e fontes elevadas para demonstrar a funcionalidade do protótipo desenvolvido no projeto de pesquisa aplicada.

Utilizamos cargas e GD condizentes com estes ajustes, de modo a adentrar na zona de proteção do relé do protetor de redes ajustado. Utilizou-se algumas cargas conectadas em 4 saídas do CBT (2 lâmpadas de vapor de mercúrio de 400 W cada, ligadas em cada uma das saídas) e a UFV conectada em 1 saída do CBT (18 placas de 330 Wp perfazendo aprox. 6 kWp) era suficiente para sensibilizar os relés de proteção do protetor de redes.

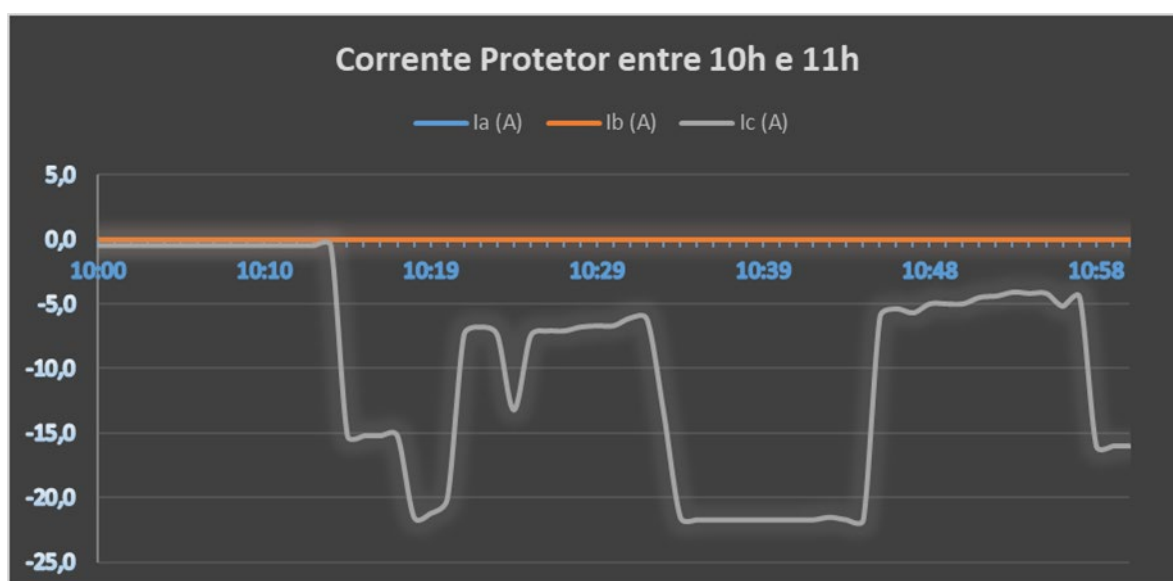
Teste no. 1: aumentar o setup do relé para além da possibilidade da GD:

- a) O que se espera no teste: que o Protetor de Redes opere normalmente com potência reversa de GD proveniente da UFV, sem desarmar;
- b) Como estabelecer a condição: ajustar o setup para 7,5 A temporizado e 15 A instantâneo e deixar o sistema em operação por 1 hora

- c) Quando atingiu-se o objetivo: verificado que no período proposto não houve trip no Protetor de Redes.
- d) Registro: foram utilizados dados coletados do sistema supervisório por 1 hora.
- e) Conclusão: pelos registros descritos a seguir temos o registro de potência reversa no Protetor por 1 hora, onde não houve atuação da proteção mesmo estando teoricamente a potência reversa na zona de atuação do relé do protetor, mas na prática tendo o C-GD informado ao relé, através da porta de comunicação RS232, que a potência reversa advinda da GD não poderia ser considerada como falha da rede de distribuição.

Na figura a seguir temos o gráfico a partir da base de dados de carga no protetor de redes obtido pelo Supervisório BluePlant instalado na área piloto. Note-se que, devido à variação de nebulosidade do dia (chuvoso), houve uma consistente variação de geração da UFV, indo de um mínimo de 0 A (antes do inversor da UFV se conectar à rede da NDB) a aprox. 22A (máxima produção da UFV).

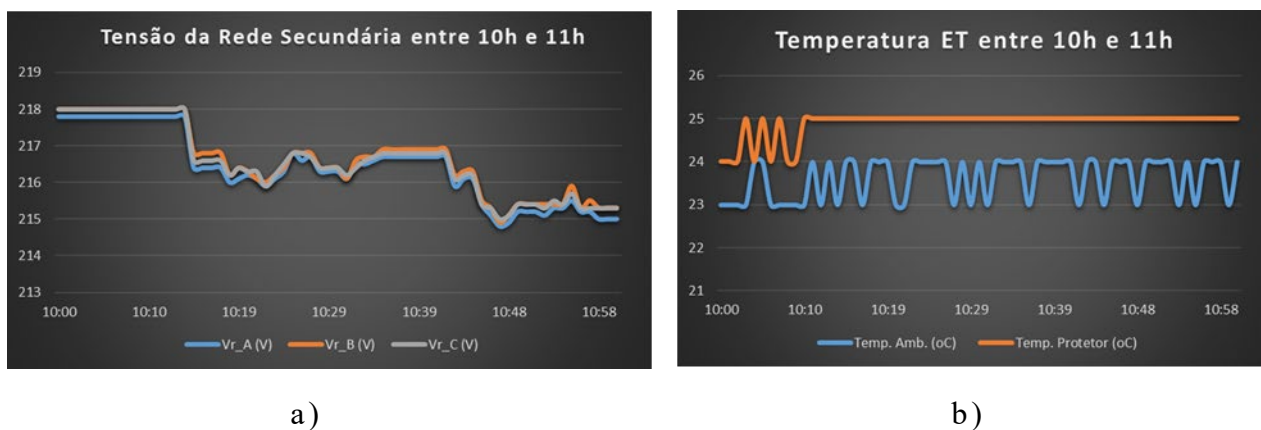
Figura 73 – Curva de carga no Protetor de Redes da área piloto entre 10h e 11h do dia 17/02/2022, demonstrando funcionamento em potência reversa na presença de GD.



Fonte: Autoral

Entre outras variáveis, apresentamos também os dados de tensão e temperatura do momento do ensaio, para registro, na Figura 74.

Figura 74 – Registros de a) Tensão de Rede e b) variação de temperatura no Protetor de Redes da área piloto entre 10h e 11h do dia 17/02/2022.



a)

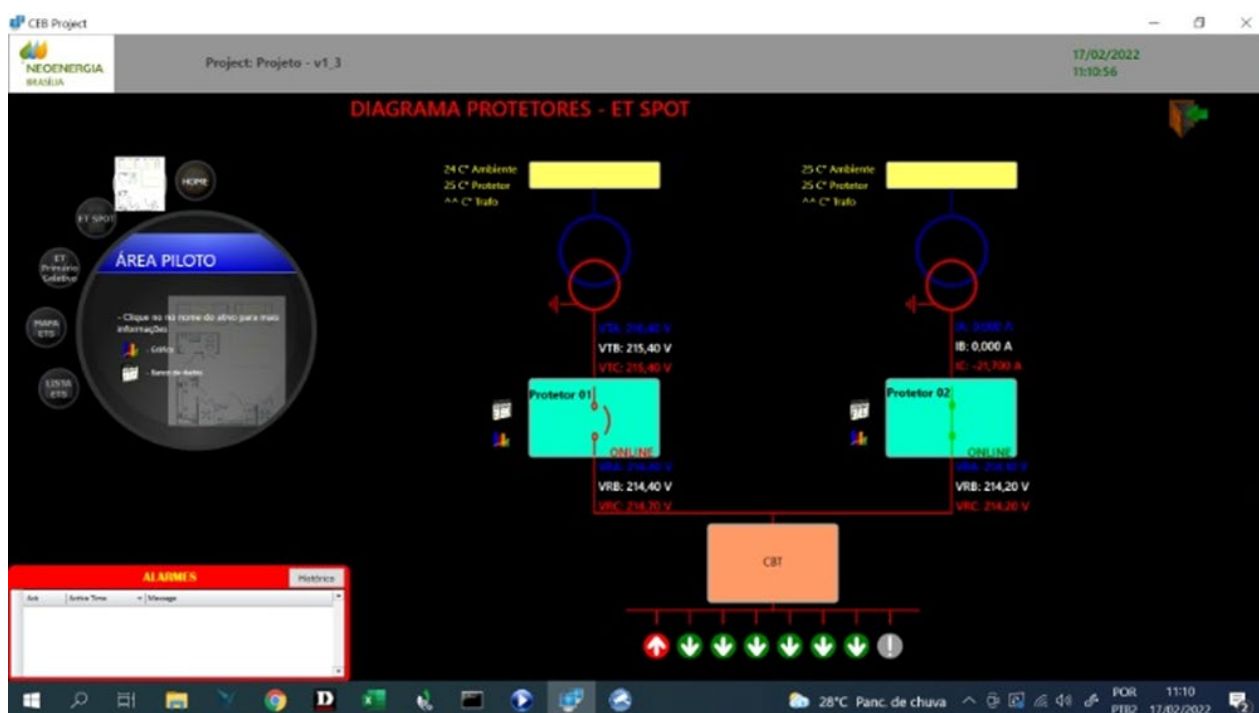
b)

Fonte: Autoral

O sistema supervisorio operou normalmente e fez todos os registros necessários ao ensaio. A Figura 75 mostra um print screen do Supervisorio BluePlant utilizado no projeto.

[Figura 75 abaixo]

Figura 75 – Imagem do sistema supervisorio BluePlant com registro de dados da área piloto, dia 17/02/2022 às 11h10m.



Fonte: Autoral

Os dados dos gráficos presentes na Figura 73 e na Figura 74 foram extraídos da Tabela 7 a seguir, disponível no supervisorio BluePlant.

[deixado em branco intencionalmente]

Tabela 7 – Dados disponíveis no supervisor BluePlant referente a registros do Protetor de Redes no. 2, das 10h00m22s às 11h00m18s do dia 17/02/2022

AJUSTE: do relé do Protetor de Redes NDB: -7,5A (10s) e -15,0A (instantânea)																		
REGISTROS: das 10:00:22 às 11:00:18; dia 17/02/2022																		
Horário (hh:mm:ss)	Temp. Amb. (oC)	Temp. Protetor (oC)	Temp. 3 (oC)	Vt_A (V)	Vt_B (V)	Vt_C (V)	Vr_A (V)	Vr_B (V)	Vr_C (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	FP_A	FP_B	FP_C	S_A (kVA)	S_B (kVA)	S_C (kVA)
10:00:22	23	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:01:20	23	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:02:18	23	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:03:16	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,98	0	0	0
10:04:14	24	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,98	0	0	0
10:05:12	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,98	0	0	0
10:06:10	23	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,98	0	0	0
10:07:08	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:08:06	23	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,99	0	0	0
10:09:04	23	24	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,99	0	0	0
10:10:02	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:11:00	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	0,98	0	0	0
10:11:58	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:12:56	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:13:54	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	217,8	218,0	218,0	0,0	0,0	-0,5	1,00	1,00	1,00	0	0	0
10:14:52	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,4	216,8	216,6	0,0	0,0	-15,2	1,00	1,00	0,98	0	0	3
10:15:50	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,4	216,8	216,6	0,0	0,0	-15,2	1,00	1,00	0,98	0	0	3
10:16:48	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,4	216,8	216,6	0,0	0,0	-15,2	1,00	1,00	1,00	0	0	3
10:17:46	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,4	216,8	216,6	0,0	0,0	-15,2	1,00	1,00	0,98	0	0	3
10:18:44	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,0	216,2	216,2	0,0	0,0	-21,5	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:19:42	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,1	216,4	216,4	0,0	0,0	-21,2	1,00	1,00	0,99	0	0	5

10:20:40	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,2	216,3	216,3	0,0	0,0	-20,1	1,00	1,00	0,99	0	0	4
10:21:38	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,1	216,1	216,3	0,0	0,0	-7,4	1,00	1,00	1,00	0	0	2
10:22:36	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,9	216,0	215,9	0,0	0,0	-6,8	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:23:34	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,1	216,2	216,2	0,0	0,0	-7,4	1,00	1,00	1,00	0	0	2
10:24:32	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,3	216,4	216,5	0,0	0,0	-13,2	1,00	1,00	1,00	0	0	3
10:25:30	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,8	216,8	216,8	0,0	0,0	-7,5	1,00	1,00	0,99	0	0	2
10:26:28	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,6	216,8	216,8	0,0	0,0	-7,1	1,00	1,00	1,00	0	0	2
10:27:26	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,8	216,7	0,0	0,0	-7,1	1,00	1,00	1,00	0	0	2
10:28:24	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,3	216,4	216,4	0,0	0,0	-6,8	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:29:22	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,3	216,4	216,4	0,0	0,0	-6,7	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:30:20	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,3	216,4	216,4	0,0	0,0	-6,7	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:31:18	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,1	216,1	216,2	0,0	0,0	-6,1	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:32:16	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,5	216,6	216,4	0,0	0,0	-6,2	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:33:14	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,5	216,7	216,6	0,0	0,0	-13,4	1,00	1,00	0,98	0	0	3
10:34:12	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,6	216,7	216,7	0,0	0,0	-21,5	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:35:10	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:36:08	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:37:06	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:38:04	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,98	0	0	5
10:39:02	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,98	0	0	5
10:40:00	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:40:58	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,98	0	0	5
10:41:56	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,7	216,9	216,8	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:42:54	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,9	216,2	216,1	0,0	0,0	-21,5	1,00	1,00	0,99	0	0	5
10:43:52	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,1	216,3	216,2	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	0,98	0	0	5
10:44:50	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	216,1	216,3	216,2	0,0	0,0	-21,7	1,00	1,00	1,00	0	0	5
10:45:48	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,4	215,5	215,4	0,0	0,0	-6,0	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:46:46	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,1	215,3	215,3	0,0	0,0	-5,4	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:47:44	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	214,8	214,9	215,0	0,0	0,0	-5,7	1,00	1,00	1,00	0	0	1

10:48:42	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	214,9	215,1	215,1	0,0	0,0	-5,0	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:49:40	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,2	215,4	215,4	0,0	0,0	-5,0	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:50:38	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,2	215,4	215,4	0,0	0,0	-5,0	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:51:36	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,2	215,4	215,4	0,0	0,0	-4,5	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:52:34	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,1	215,4	215,3	0,0	0,0	-4,4	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:53:32	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,3	215,4	215,5	0,0	0,0	-4,1	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:54:30	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,3	215,4	215,4	0,0	0,0	-4,2	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:55:28	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,5	215,9	215,7	0,0	0,0	-4,2	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:56:26	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,2	215,3	215,3	0,0	0,0	-5,2	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:57:24	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,2	215,5	215,3	0,0	0,0	-4,5	1,00	1,00	1,00	0	0	1
10:58:22	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,0	215,3	215,3	0,0	0,0	-16,0	1,00	1,00	0,98	0	0	3
10:59:20	23	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,0	215,3	215,3	0,0	0,0	-16,0	1,00	1,00	1,00	0	0	3
11:00:18	24	25	^^	215,5	216,5	215,0	215,0	215,3	215,3	0,0	0,0	-16,0	1,00	1,00	1,00	0	0	3

Legenda:

Temp. Amb. (oC): temperatura ambiente da ET, em graus Celsius
Temp. Protetor (oC): temperatura interna do Protetor de redes, em graus Celsius
Temp. 3 (oC): temperatura 3ª. Termopar (aberto), em graus Celsius
Vt_A (V), Vt_B (V), Vt_C (V): tensão do transformador das fases A, B e C respectivamente, em V
Vr_A (V), Vr_B (V), Vr_C (V): tensão de rede das fases A, B e C respectivamente, em V
Ia (A), Ib (A), Ic (A): corrente das fases A, B e C respectivamente, em A
FP_A, FP_B, FP_C: fator de potência das fases A, B e C respectivamente
S_A (kVA), S_B (kVA), S_C (kVA): potência aparente das fases A, B e C respectivamente, em kVA

Fonte: Autoral

Teste no. 2: inserção e retirada de cargas de forma abrupta para gerar transitórios de corrente reversa no equipamento protetor de redes

Considerando-se que a variação de GD disponibilizada pelo inversor da UFV é lenta em comparação com transitórios elétricos, dando tempo do C-GD fazer as leituras de todos os Smart TC e ajustar o relé, propomos um teste adicional de modo a que fosse inserida/retirada cargas de forma abrupta. Deste modo, a proposta foi alterar a potência reversa que transita no Protetor de Redes, de forma abrupta, e colocar o sistema elétrico na zona de atuação instantânea do relé de proteção.

- a) O que se espera no teste: que o Protetor de Redes opere normalmente com potência reversa de GD proveniente da UFV, sem desarmar, na presença de transitórios;
- b) Como estabelecer a condição: ligar todas as cargas e a GD e ajustar o setup do relé do protetor de redes para uma corrente nominal acima do valor resultante, de modo que, ao tirarmos as cargas (lâmpadas de descarga), a UFV deixe de alimentar as lâmpadas, aumentando o fluxo de corrente reversa no protetor de redes (retornando energia à rede primária da concessionária).
- c) Quando se atingiu o objetivo: com os degraus de carga negativa não houve abertura do protetor de redes pelo efeito transitório (esperado pois a corrente reversa proveniente da GD não é uma falha da rede elétrica).
- d) Registro: foram utilizados dados coletados por registro fotográfico.

Considerando que o nível de GD dependia do horário e fator climático (nível de nebulosidade) para os testes, foi necessário ajustar (diminuir no caso) o setup dos relés dos protetores para adentrar a zona de proteção dos mesmos, visto ser a geração de energia variável, o que permitiu operar em várias configurações até mais restritas com relação a relação sinal/ruído e DHT – distorção harmônica total, enriquecendo qualitativamente os testes. Foi feito então no relé do protetor de redes, os seguintes ajustes:

- a) Corrente reversa temporizada: 1,5 A (10 segundos);

b) Corrente reversa instantânea: 2 A.

A figura a seguir mostra os ajustes feitos no relé do protetor de redes para os testes com cargas e geração transitórias.

Figura 76 – Ajustes de corrente reversa temporizada (-1,5 A) e instantânea (-2 A) para os testes com transitórios de carga e GD.



Fonte: Autoral

A corrente resultante no Protetor de Redes com a UFV em funcionamento (geração menor que a máxima pois estava nublado) e 6 cargas de 400 W (lâmpadas de descarga) foi de aproximadamente +9,8 A (no momento do registro fotográfico). A potência estava positiva no protetor de redes visto que, por ser a carga maior que a GD naquele momento, havia necessidade de “complementação” de potência pela rede da concessionária.

Figura 77 – Corrente com potência positiva transitando pelo Protetor de Redes ao ligarmos todas as cargas e a UFV ao mesmo tempo.



Fonte: Autoral

Lembrando que a situação da corrente (potência positiva) descrita na figura acima era uma condição variável e dependia da nebulosidade. Mas estando no quadrante positivo de potência no protetor, ou seja, havendo consumo de energia da concessionária por parte da carga, ao tirarmos as cargas, toda a geração da UFV, ou seja, GD, iria retornar para a rede, criando vários cenários de alternância instantâneas de fluxo de carga, ora positiva, ora negativa, e com vários valores estabelecidos.

O ajuste de corrente reversa instantânea em -2A no relé do protetor foi justamente para que, nos transitórios, adentrássemos na região de atuação do relé. O desafio era que o C-GD conseguisse fazer a leitura dos Smart TC, que sofreria vários transitórios, e em nenhum deles haveria abertura do protetor. O algoritmo desenvolvido deveria então ser capaz de lidar com essas variações, sem que houvesse trip no protetor.

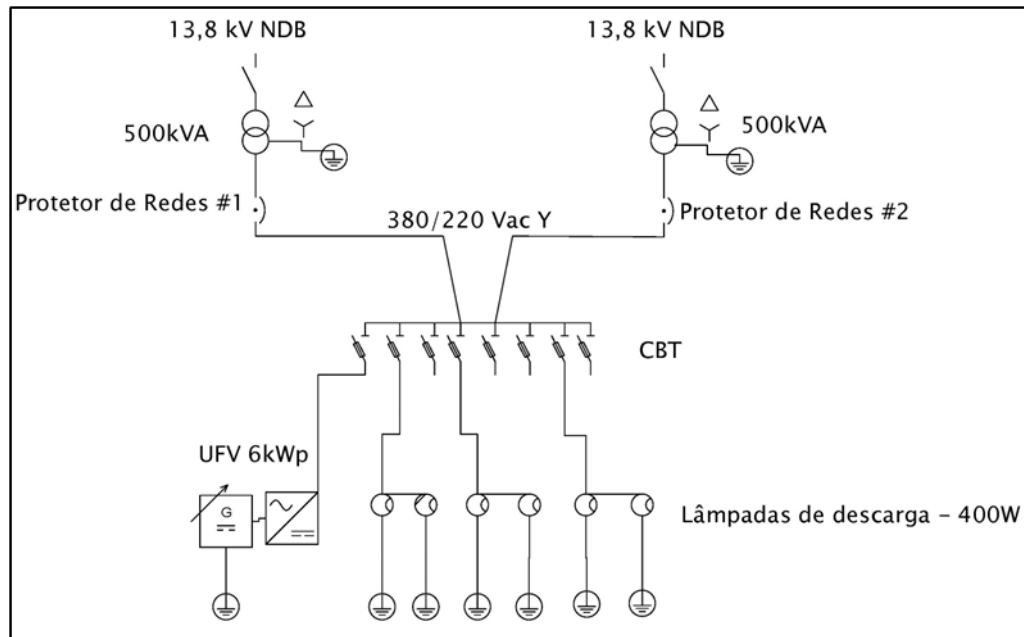
Foram instalados shunts de 0,33 ohm nas saídas do CBT para as lâmpadas de descarga e 0,25 ohm na saída do CBT para a UFV, para leitura e registro dos transitórios de correntes por osciloscópio. Utilizou-se 3 canais:

- a) Canal 1 (curva em amarelo): destinada à corrente da UFV;
- b) Canal 2 (curva em azul): destinada à corrente de 4 lâmpadas de 400 W;
- c) Canal 3 (curva em ciano): destinada à corrente de 2 lâmpadas de 400 W.

Obs: lâmpadas de descarga de vapor de mercúrio (fabricantes e fatores de potência distintos).

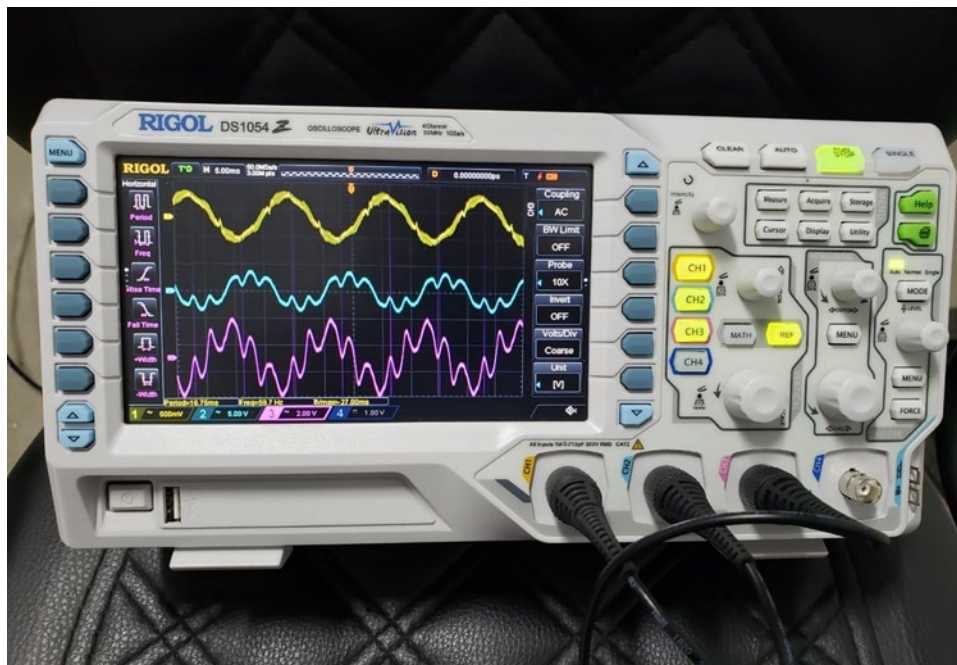
[Figura 78 abaixo]

Figura 78 – Diagrama unifilar de manipulação de cargas nos testes de funcionamento do C-GD na presença de GD e cargas.



Fonte: Autoral

Figura 79 – Oscilografias das correntes da UFV e das lâmpadas de descarga vapor metálico.



Fonte: Autoral

Foram feitas sequencialmente operações de entrada/saída de cargas e UFV para verificar o comportamento do Protetor de Redes operando com o C-GD (comunicando com os Smart TC):

a) Operação #1: registro inicial, com UFV e todas as cargas ligadas.

Figura 80 – Oscilograma de registro inicial, com UFV e todas as cargas ligadas



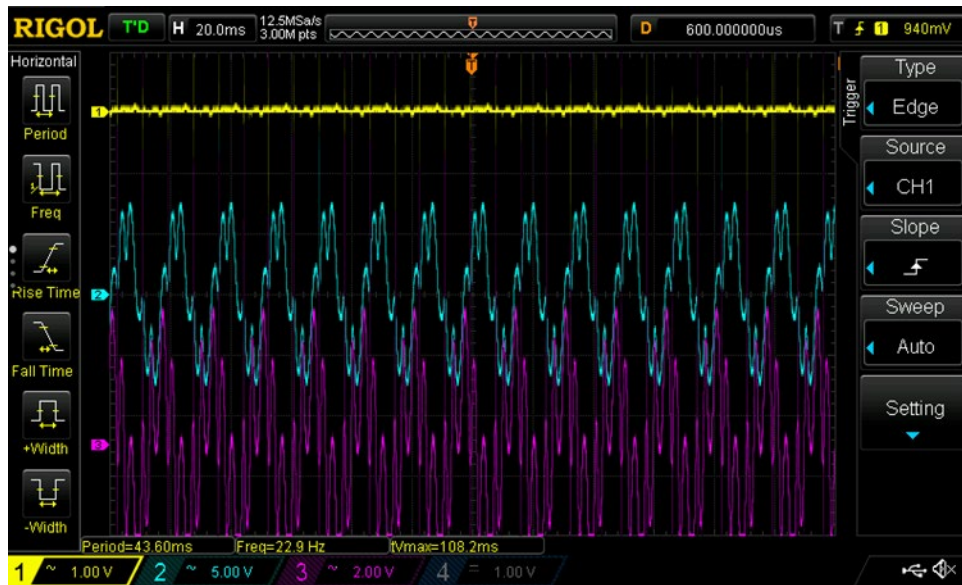
Fonte: Autoral

b) Operação #2: Transitório com a retirada da UFV

- Condição inicial: UFV e 6 lâmpadas ligadas;
- Condição de transitório: retirada a UFV.

[Figura 81 abaixo]

Figura 81 – Oscilograma de transitório com a retirada da UFV.



Fonte: Autoral

c) Operação #3: Transitório inserindo-se carga (I).

- Condição inicial: UFV e 4 lâmpadas ligadas (1600W);
- Condição de transitório: acrescentado 800 W (2 lâmpadas). Notar o transitório de corrente registrado no instante da comutação.

Figura 82 – Oscilograma de transitório inserindo-se carga (I).

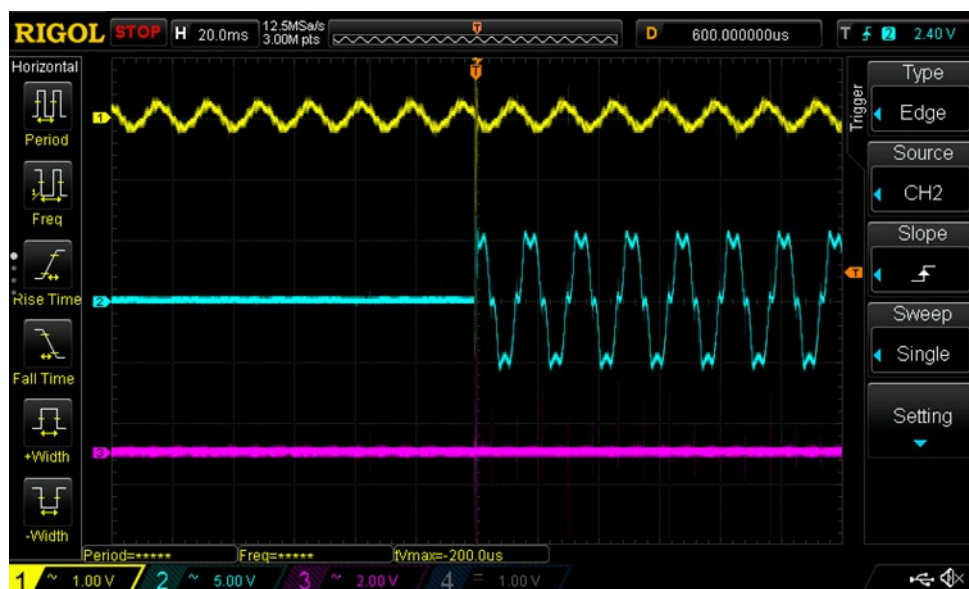


Fonte: Autoral

d) Operação #4: Transitório inserindo-se carga (II).

- Condição inicial: UFV ligada;
- Condição de transitório: acrescentado 1600 W (4 lâmpadas).

Figura 83 – Oscilograma de transitório inserindo-se carga (II).

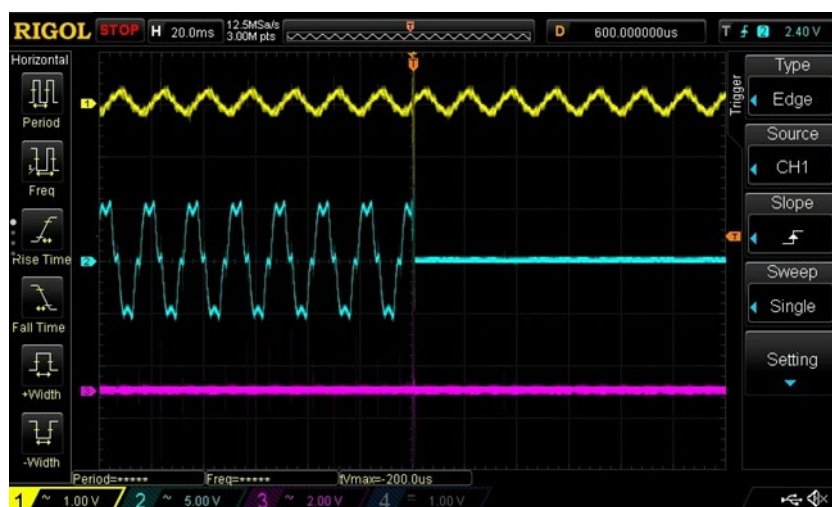


Fonte: Autoral

e) Operação #5: Transitório retirando-se carga.

- Condição inicial: UFV e carga de 1600 W ligadas;
- Condição de transitório: retirada de 1600 W (4 lâmpadas).

Figura 84 – Oscilograma de transitório retirando-se carga.

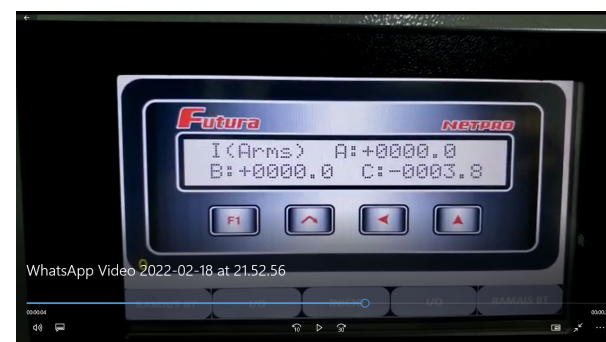
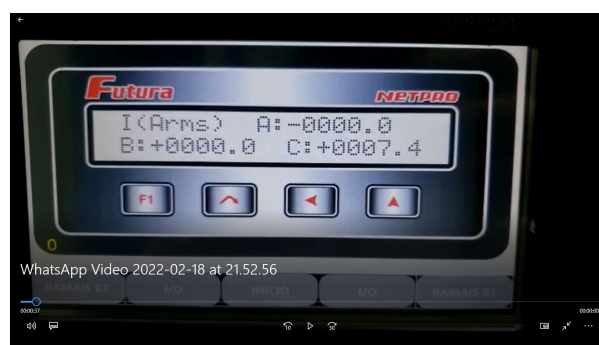


Fonte: Autoral

f) Operação #6: Transitório retirando-se cargas para adentrar no modo de potência reversa no protetor de redes

- Condição inicial: UFV ligada e 6 lâmpadas de 400W ligadas.
- Condição de transitório: retirada progressiva da carga para alterar a potência passante pelo protetor de redes até adentrar em potência reversa, valor acima do ajustado no relé, de $-1,5A$ temporizado e $-2A$ instantâneo.

Figura 85 – Sequência de oscilogramas de transitório retirando-se carga e verificando-se a alteração da carga passante pelo Protetor de Redes até adentrar a zona de atuação da proteção instantânea do relé, mas sem trip devido ao fato da origem da potência reversa ser de GD.



Fonte: Autoral

6.2.3. Conclusões acerca do funcionamento do sistema desenvolvido – operação do C-GD em conjunto com o relé de proteção do Protetor de Redes

Avaliamos o funcionamento do C-GD tanto na condição desconectado dos Smart TC quanto na condição de conexão aos Smart TC via rede de comunicação RS485, que permitiu o reconhecimento de GD.

Foram realizados testes estáticos e em transitórios. Os testes permitiram verificar o funcionamento do sistema Spot na presença de GD, pois houve:

- a) A distinção da GD pelo relé do protetor de redes;
- b) Operação normal, atuando a proteção quando cortada a conexão entre o hardware do controlador de GD e os Smart TC do painel de distribuição da ET, o CBT;
- c) Distinção entre GD e falha pelo relé do protetor de redes.

7. RESULTADOS DO PROJETO

7.1. Especificação Técnica do Produto Principal

O produto principal é um sistema de modernização para a ET (Estação Transformadora) do tipo Spot Network da NDB. O sistema de modernização inclui 3 componentes principais:

- a) Controlador de GD: é uma Interface Homem-Máquina (IHM) com três processadores que substitui a IHM do protetor atual e adiciona funções de monitoramento local para todas as cargas e geradores conectados à ET. Além disso, ele calcula o nível de GD presente em cada ciclo de varredura das correntes fasoriais das saídas do barramento de baixa tensão principal da ET (CBT). Outro processador do C-GD mantém comunicação constante com o relé do protetor de redes para atualizar o nível de potência reversa que o relé deve ignorar durante a análise da potência reversa para geração de um desarme no protetor de redes.
- b) TCs trifásicos desenvolvidos especificamente para o CBT: são instalados como extensão de cada saída do CBT e medem grandezas como tensão, corrente, potência e fator de potência nos quatro quadrantes. Os TCs se comunicam com o C-GD através de uma rede RS-485 com endereçamento ajustado na instalação. Essa rede é redundante e, caso ocorra perda de conexão em um lado, as leituras dos TCs continuam no modo radial, gerando um alarme de perda do anel RS-485.
- c) Repetidor de comunicação RS-485 com fonte redundante: é um equipamento que permite a comunicação entre o C-GD e os TCs na rede 485 em anel. Ele possui uma fonte de alimentação redundante, e cada parte do anel se comunica por uma das fontes. Em caso de perda de uma das fontes, a comunicação continua funcionando. Além disso, atua como booster de sinal 485, otimizando a relação sinal/ruído e permitindo uma leitura mais rápida dos TCs.

É importante ressaltar que não há nenhum equipamento similar disponível no mercado nacional ou internacional para comparação com o funcionamento do produto principal. O objetivo é permitir a operação das ETs Spot Network com a presença de GD, mantendo as características originais de proteção na ocorrência de falha na rede de distribuição primária.

7.2. Critérios de Originalidade

7.2.1. Originalidade do Produto Principal

A inovação tecnológica do produto principal consiste no desenvolvimento de um equipamento que possibilita que protetores de rede operem simultaneamente com instalações de geração distribuída, sem limitações de potência até o valor nominal da ET. Além disso, o equipamento mantém as mesmas características de proteção originais em caso de falha na rede primária.

Não existem produtos similares nos projetos de P&D da ANEEL. Embora haja abordagens teóricas em publicações internacionais, este produto se destaca por apresentar uma solução prática testada em uma rede da concessionária, com baixo custo de implantação e aproveitamento das instalações existentes.

A busca de anterioridade foi feita no site da ANEEL (www.aneel.gov.br) em 08/03/2022 na página de Gestão do Programa (diretório: Informações Técnicas/Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e Eficiência Energética/Programa de P&D/Gestão do Programa). Nele foram verificadas as palavras chave: Geração Distribuída ou GD, Protetor de Redes, Protetor de Reticulado, Reticulado e Spot. As buscas trouxeram 4 resultados para Reticulado, 1 para Protetor de Redes e 33 para Geração Distribuída ou GD.

Nas buscas por Reticulado e Protetor de Redes, encontramos 5 projetos, entre os anos de 2009 e 2013, todos versando sobre perdas (técnicas e não técnicas), localização de falhas e monitoramento da rede.

Nas buscas por Geração Distribuída ou GD, foram encontrados 32 projetos iniciados entre 2009 e 2018. Dentre eles, pudemos agrupá-los do seguinte modo:

- a) Planejamento: 14;
- b) Novos Equipamentos: 3;
- c) Proteção e Operação: 7;
- d) Modelos de Negócios: 4
- e) Usos Finais: 4.

No quesito Planejamento, verificaram-se 14 projetos que buscavam estudar e aplicar metodologias quanto ao impacto e os limites da rede de distribuição frente à implantação da geração distribuída. Quanto a Novos Equipamentos, os 3 projetos procuravam melhorar algum parâmetro ou nacionalizar equipamentos importados. Já na Proteção e Operação, com 7 projetos, buscou-se a coordenação das proteções e o impacto na qualidade de energia da GD. E por fim Modelos de Negócio (4 projetos) buscavam novos modelos para comercialização de energia, e Usos Finais (4) o uso de GD em iluminação pública ou telhados.

A temática que mais se assemelha ao projeto de pesquisa que ora é apresentado seria de Novos Equipamentos, cuja análise dos 3 projetos da base de dados da Aneel não mostra nenhuma semelhança, visto que ali tínhamos: Inversor com baixa DHT (Distorção Harmônica Total), Conversor estático para GD eólica e Gerador eólico nacional para GD.

Mesmo na família Proteção e Operação, os 7 projetos apresentados se apresentavam de modo reativo à instalação da tecnologia (verificação de proteção e limites de operação), sendo que nenhum deles, sem qualquer demérito ou juízo de valor, nem cabe tal análise, atacou a problemática da GD na rede de distribuição subterrânea do tipo Spot Network.

No entanto, enquanto esta pesquisa foca no desenvolvimento de equipamentos para a operação eficiente de sistemas de geração distribuída, em uma pesquisa com as mesmas palavras chaves no site de teses.usp.br a tese de doutorado intitulada "Metodologia de aplicação de geração distribuída fotovoltaica em baixa tensão nos reticulados subterrâneos das distribuidoras de energia elétrica", de Barreto, 2014

[25], aborda especificamente a operação de geração distribuída fotovoltaica em reticulados subterrâneos de distribuição de energia elétrica. O estudo concentra-se na superação das limitações impostas pelos equipamentos de proteção conhecidos como Protetores de Rede, os quais podem inviabilizar a geração distribuída ao desconectar os transformadores de média para baixa tensão, causando o isolamento da GD em casos de fluxo de potência reverso. Essa metodologia foi testada com dados reais de subestações de reticulado, proporcionando novos comportamentos para os protetores de rede, viabilizando a conexão segura e simplificada da geração distribuída.

7.2.2. Originalidade das Técnicas Empregadas

A originalidade das técnicas empregadas está contida no algoritmo de separação entre o que é uma falha na rede que gera potência reversa e a geração distribuída, que também gera potência reversa. Mais ainda, nos transitórios em que há uma combinação de possibilidades entre GD, carga e falha na ET, cujas combinações foram testadas e cujo resultado permitiu inferir que o algoritmo atendeu à necessidade de distinção entre falha e GD, mesmo em transitórios.

Para permitir que o algoritmo fosse implementado dentro de um compromisso técnico-econômico, foi desenvolvido um equipamento micro-controlado (C-GD), com 3 processadores, de modo a termos performance, manter a comunicação de monitoramento externo por DNP3 e ainda manter a comunicação com o relé do Protetor de Redes. Deste modo, conseguiu-se o máximo de desempenho com um mínimo de custo de equipamentos, visto que o desenvolvimento do C-GD foi feito no desenrolar do projeto: ele é otimizado, tendo uma placa motherboard no qual é gravado o firmware do algoritmo e um display colorido tipo touch screen para fazer a interface homem-máquina.

O C-GD desenvolvido pode ser classificado como um IED: do inglês intelligent electronic device (dispositivos eletrônicos inteligentes), que se caracterizam por agregar recursos com redução no custo de implantação e na manutenção, com quantidade restrita de cabos e

equipamentos necessários à sua utilização. Isto possibilita a troca de informações mais rápidas com outros dispositivos e a simplificação do projeto, apresentando maior confiabilidade, além de permitir a sincronização temporal destes dispositivos, no caso dos TCs, do relé de proteção do protetor de redes e de comunicação para monitoramento.

O caráter inovador do projeto se apresenta portanto na aplicação de algoritmos exclusivos nos equipamentos eletrônicos inteligentes IED, na fronteira com o cliente, para tratar das interferências geradas pela geração distribuída GD e estabelecer parâmetros de operação da malha de distribuição da concessionária NDB, atuando nos equipamentos chaves da rede, permitindo ainda criar uma base de conhecimento ainda inédita no Brasil sobre os protocolos de operação e expansão da rede, comparando os sistemas primário seletivo, spot network e radial. Esses algoritmos foram complementados por algoritmos implantados também em nível de supervisão, em servidor instalado na NDB, de modo que haja 2 níveis de atuação, local e na malha como um todo, gerando novos parâmetros de ação e expansão da própria rede. Considerando que nos Estados Unidos há um limite em torno de 5% de inclusão de GD em circuitos de grandes metrópoles em malha (limitando a expansão da malha de geração distribuída conectada diretamente na rede), o uso de uma malha diversificada como a de Brasília se justifica. Estes assuntos foram tratados no desenvolvimento do P&D e permitem ganhos inerentes ao Meio Ambiente com a Geração Distribuída. Os processos de regulação dos equipamentos, que normalmente são manuais, podem agora ser implementados de modo automático e falhas ou ajustes que necessitem interação de equipes podem ser implementados de modo a gerar listas automáticas de ordens de serviço, para melhor operação da rede implantada com geração distribuída, implementando um processo Smart Grid de alto nível. Os processos Smart Grid no Brasil têm se limitado a medição de consumidores, havendo neste caso um grande salto tecnológico.

A intersecção de temas como a Geração Distribuída, o Smart Grid e Redes de Distribuição subterrâneas já foi tratado no Brasil e no exterior em artigos e teses, mas não há paralelo quanto a sua aplicabilidade

prática. Sabe-se, porém, ser necessária e de extrema urgência sua implementação, visto que a ANEEL e legislação federal já estabeleceram os parâmetros para os consumidores poderem usufruir de tal tecnologia, sendo que a concessionária necessita estar na dianteira desta fronteira tecnológica, fato obtido com êxito neste projeto de pesquisa.

7.3. Critério de Aplicabilidade

7.3.1. Âmbito da Aplicação

Como produto secundário do projeto, temos um sistema de monitoramento da GD em todas as ETs da RDS. Ou seja, a NDB se beneficiará deste produto final pela possibilidade de utilizá-lo em sua RDS quando da necessidade de acompanhar a evolução da GD em cada uma das ETs que vier a instalar.

Mas o produto principal, sistema de retrofit das ETs Spot Network, trará o benefício à NDB de permitir que o consumidor/gerador possa instalar em sua rede sistemas e GD sem que haja necessidade de análise mais aprofundadas ou preocupação com desarmes do equipamento protetor de redes por injeção de potência reversa. A análise poderá se restringir à limitação da potência máxima da GD, que deve ser compatível com a potência da ET ao qual estará conectada.

O setor elétrico se beneficiará por ter à disposição uma concepção funcional de monitoramento de GD por parte da concessionária, nas ETs, de modo a permitir a evolução da potência instalada e gerada. Ainda, outras concessionárias que se utilizam do sistema Spot Network poderão implementar a tecnologia do Controlador de GD.

Pode-se elencar a aplicabilidade do seguinte modo:

- a) Distribuidora de energia: terá avaliado a expansão da geração distribuída visto que o aumento das instalações atingiu uma taxa de crescimento que requer muitos recursos humanos e técnicos da concessionária, sendo que não estava equacionado tecnicamente a ligação destas cargas diretamente na rede Spot Network.

- b) Instituição de pesquisa: na geração do conhecimento técnico-científico para as entidades envolvidas, com possibilidade de formação de mão de obra especializada, além de publicação de artigos técnicos/científicos.
- c) Indústria de Equipamentos Elétricos: fomentará a criação de estratégias para a solidificação da cadeia de equipamentos elétricos para mercado em expansão sem know-how específico, com incentivos aos desdobramentos desta pesquisa aplicada.
- d) Consumidores: estimulará o interesse dos consumidores na Geração Distribuída, visto as restrições existentes atualmente por parte das concessionárias nos grandes centros quanto a ligação direta nos circuitos reticulados.

7.3.2. Abrangência da Aplicação

O produto final do projeto de pesquisa apresenta, como dito, duas vertentes: o objeto principal que é o sistema de retrofit para subestações da RDS que apresentam GD e secundário, que é um sistema de monitoramento que utiliza os dados dos equipamentos projetados, de modo a fornecer uma ferramenta avançada de monitoramento de GD na RDS. Ambos foram pensados exclusivamente para a rede elétrica. Embora possamos aplicar os conhecimentos adquiridos e o produto principal – Controlador de GD – em ambientes onde há necessidade do conhecimento do nível de geração distribuída e o controle da mesma também por parte dos consumidores/geradores, ao invés da concessionária; como por exemplo em gerações fotovoltaicas conectados em sistemas on grid e off grid, onde o responsável pela geração necessita do controle da geração e do consumo de cada um dos entes conectados ao sistema de geração.

7.3.3. Restrições de Aplicação

Considerando que a aplicação do produto final do projeto é um sistema de retrofit que melhora o nível de automação da RDS, que vem a automatizar completamente as Estações Transformadoras de Baixa Tensão, e que este processo de automação é desejável num curtíssimo prazo pela NDB, não vemos restrições econômicas de aplicação do produto. Isto porque, ao solucionar uma problemática tecnológica em sua rede de distribuição subterrânea, ao mesmo tempo implementa um sistema de automação que vai além das necessidades atuais, pois inclui um nível de detalhamento abrangente da geração distribuída, além dos parâmetros desejáveis de variáveis analógicas e digitais presentes nas ETs. Ou seja, a concessionária, ao aplicar o resultado do projeto de pesquisa para solucionar a problemática do convívio da GD com o sistema Spot Network, ao mesmo tempo automatiza sua RDS. Além disso, muito recurso humano é economizado pois temos a eliminação de todo o processo de análise de solicitação e implementação de GD na RDS, além do acompanhamento do seu funcionamento, que consome muitas horas de análise e discussão de pessoal qualificado, além do desgaste da companhia frente ao consumidor/gerador. Isto porque tem tido que aplicar as soluções tradicionais de GD na RDS Spot, que são a de limitar a potência da GD a níveis muito restritivos e/ou solicitar a implantação de sofisticados sistemas de gerenciamento da produção versus consumo (de modo a não permitir qualquer tipo de retorno de energia para a rede da concessionária), conforme descrito anteriormente.

Já do ponto de vista de restrição técnica temos a considerar que o sistema desenvolvido, de solucionar automaticamente a convivência entre GD e reticulado, é para o sistema Spot Network, não sendo aplicável para o sistema reticulado Grid Network. Para aplicação ao sistema Grid Network, e partindo do nível tecnológico que já foi desenvolvido para o sistema Spot Network, há que se fazer adaptações e testes, de onde indicamos a continuidade do projeto com outra concessionária que utiliza o sistema Grid, que não é o caso da NDB.

7.3.4. Testes de Funcionalidades

Para os testes finais do projeto de pesquisa foi feita a programação em linguagem Assembler do algoritmo desenvolvido para o Controlador de Geração Distribuída – C-GD, cujo funcionamento simulado e emulado foi testado de forma abrangente no decorrer do projeto, para o chip do microcontrolador linha 8051 da placa V80H (motherboard do C-GD). Testado o funcionamento da placa (fonte, clock, endereçamento de periféricos, etc.), testou-se também todos os softwares desenvolvidos para suporte do funcionamento do programa principal do algoritmo (comunicação RS-232, RS-485 e comunicação com o display colorido de IHM), partiu-se para teste operacional tanto na bancada de ensaios como em escala real na ET Spot Network da área piloto.

O relé do protetor de redes recebeu nova versão de firmware para comunicação com o C-GD. Deste modo pôde interpretar as variáveis de GD lidas pelo C-GD junto aos Smart TC via rede de comunicação serial RS485 e disponibilizada via comunicação serial ao relé do protetor de redes via serial RS232.

Embora a ET Spot da área piloto seja um Spot de 2 transformadores, a proposta apresentada a seguir foi desenvolvida para o Spot de 3 transformadores, para futuras análise, embora a viabilidade da técnica possa ser perfeitamente avaliada num Spot de 2 transformadores (o efeito a ser registrado é o convívio entre GD e Spot Network, cujo efeito maior a ser verificado é o de não ilhamento do cliente consumidor/gerador da concessionária de distribuição) e o do reconhecimento da GD injetada na rede como sendo uma não-falha, não tripando o relé do protetor de redes mesmo estando em sua zona de atuação.

Os ensaios se deram então através de variações de potência de carga e de GD proveniente da UFV, com abertura/fechamento de circuitos ligados ao painel de baixa tensão (CBT) como componente de operação da ET da área piloto na presença de Geração Distribuída na rede.

Embora os transformadores da ET Spot Network da área piloto fossem de 500 kVA (corrente nominal de aprox. 750 A), os testes foram realizados na faixa de operação dos ajustes do relé de proteção feitos pela concessionária (7,5 A no ajuste temporizado e 15 A no ajuste instantâneo para potência reversa), de modo a não necessitarmos de

cargas muito elevadas para demonstrar a funcionalidade o protótipo desenvolvido no projeto de pesquisa aplicada.

Os testes finais, portanto, foram no sentido da variação das correntes presentes no Nó Kirchoff CBT indicado na equação (2) (Capítulo 6). Utilizamos cargas e GD condizentes com estes ajustes, de modo a adentrar na zona de proteção do relé do protetor de redes ajustado. Utilizou-se algumas cargas conectadas em 4 saídas do CBT (2 lâmpadas de vapor de mercúrio de 400 W cada, ligadas em cada uma das saídas) e a UFV conectada em 1 saída do CBT (18 placas de 330 Wp perfazendo aprox. 6 kWp) era suficiente para sensibilizar os relés de proteção do protetor de redes.

Dependendo do horário e fator climático (horário, nuvens, chuva) para os testes, foi necessário diminuir o setup dos relés dos protetores para adentrar a zona de proteção dos mesmos, visto ser a geração de energia variável conforme condições climáticas e horário do dia, o que permitiu operar em várias configurações até mais restritas com relação a sinal/ruído e presença de harmônicos, enriquecendo qualitativamente os testes.

8. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Em síntese, este trabalho de mestrado apresentou resultados promissores na aplicação de um modelo de sistema de retrofit para o sistema reticulado de distribuição elétrica, com foco especial na integração da geração distribuída (GD) com o sistema Spot Network da concessionária NDB. O produto principal desenvolvido, o Controlador de GD (C-GD), revelou-se uma solução inovadora e pioneira, permitindo que os protetores de rede operem de forma concomitante com instalações de GD, sem desarmes na presença da potência reversa, enquanto mantém as características originais de proteção na ocorrência de falha na rede primária.

A validação da originalidade e inovação tecnológica do produto principal foi assegurada por uma rigorosa busca de anterioridade, que não revelou equipamentos ou projetos similares em outras pesquisas da ANEEL. Além disso, este trabalho enfatizou a aplicação de técnicas exclusivas nos equipamentos eletrônicos inteligentes (IEDs) do sistema, proporcionando desempenho otimizado e redução de custos de implantação e manutenção.

Quanto à aplicabilidade, destaca-se que este projeto tem o potencial de beneficiar não apenas a concessionária de energia (NDB), melhorando o gerenciamento da GD e automatizando suas subestações, mas também o setor elétrico como um todo. O produto final demonstrou ser aplicável em diversos contextos, desde distribuidoras de energia até instituições de pesquisa, a indústria de equipamentos elétricos e consumidores interessados em utilizar a GD como fonte de energia.

Os testes de funcionalidades realizados com sucesso constituem uma base sólida para a continuidade deste trabalho, possibilitando sua adaptação para o sistema reticulado Grid Network e a realização de estudos complementares com outras concessionárias que utilizam esse tipo de sistema. A viabilidade técnica e econômica do produto principal ressalta seu potencial de aplicação em larga escala, proporcionando benefícios significativos ao setor elétrico e à sociedade.

Em resumo, este trabalho de mestrado representa uma contribuição relevante para a pesquisa aplicada no campo da geração distribuída e do sistema reticulado de distribuição elétrica. Os resultados obtidos representam um avanço significativo na automação e gerenciamento de redes elétricas com GD, possibilitando a integração eficiente e segura de novas fontes de energia no sistema. Com a continuidade deste trabalho e a expansão de sua aplicação para outros sistemas e concessionárias, estamos caminhando em direção à consolidação dessa inovação tecnológica no cenário energético nacional e internacional, contribuindo para um futuro mais sustentável e inteligente no setor elétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*

- [1] COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA (CEB). **CEB**. Website. Disponível em: <https://www.ceb.com.br/>.
- [2] COSTA, L.; NIEMEYER, O. **Plano Piloto de Brasília: relatório do plano piloto**. Brasília: Companhia Editora de Brasília, 1987.
- [3] GARCIA, D. A. de A., **Estudos para Inserção de Geração Distribuída em Redes Secundárias de Distribuição de Energia tipo Spot e Grid Network pelo Uso de Relés com Proteção Adaptativa**. Artigo acadêmico apresentado no XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2022.
- [4] BURKE, J.J.: **Power Distribution Engineering - Fundamentals and Applications**, Ed. Marcel Dekker, New York, USA, 1994.
- [5] BEHNKE, M. ERDMAN, W., HORGAN, S., DAWSON, D., FEERO, W., SOUUDI, F., SMITH, D., WHITAKER, C., KROPOSKI, B. **Technical Report NREL/TP-560-38079 - July 2005** : Secondary Network Distribution Systems Background and Issues Related to the Interconnection of Distributed Resources. National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [6] EATON, **Spot Network Equipment**, Sheet 18001, Setembro, 2011, disponível em www.eaton.com/consultants, acesso em 20 de Julho, 2023.
- [7] HELDWEIN, M. L. **Introdução às redes de distribuição**. UFSC, Florianópolis, 2012. Disponível em <http://heldwein.prof.ufsc.br/files/2012/09/Aula-05-Sistemas-de-distribuicao.pdf>, acesso em 20 de Julho, 2023.
- [8] GARCIA, D. A. de A., **Metodologia de diagnóstico automático de falhas de curto-circuito em alimentadores primários de sistemas de distribuição reticulados tipo Spot**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2006. Disponível em <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-11122006-140213/pt-br.php> acesso em 20 de Julho, 2023.
- [9] GREENER, Strategic Report: Distributed Generation PV Market Brazil – 1st Half 2021, São Paulo, Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/strategic-report-distributed-generation-pv-market-brazil-1st-half-2021/>, acesso em 20 de Julho, 2023.
- [10] CUTLER-HAMMER, **Spot Network Systems**, Technical Data TD.52.01A.T.E, Estados Unidos, 1999.

* De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

- [11] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE C57.12.44 - 2014**: Standard Requirements for Secondary Network Protector. IEEE, 2014.
- [12] JORDAN, N. R. **Integration of network protector relays on downtown distribution networks with penetration of renewable energy**. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2014.
- [13] DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE Empresa. Nota Técnica DEA 19/14–Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil–Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/>, acesso em 03 de Setembro, 2023.
- [14] HENDERSON, M.I., NOVOSEL, D., CROW, M. **Electric Power Grid Modernization Trends, Challenges, and Opportunities**. IEEE, 2017.
- [15] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE 1547 – 2018**: IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE, 2018.
- [16] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE 1547.1 – 2020**: IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Energy Resources with Electric Power Systems and Associated Interfaces. IEEE, 2020.
- [17] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE 1547.2 -2008**: IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE, 2008.
- [18] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE 1547.3 -2007**: IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems. IEEE, 2007.
- [19] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **1547.4 - 2011** IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. IEEE, 2011
- [20] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **1547.5** Draft Technical Guidelines for Interconnection of Electric Power Sources Greater than 10MVA to the Power Transmission Grid.
- [21] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE 1547.6 – 2011**: IEEE Recommended Practice for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems Distribution Secondary Networks. IEEE, 2011.
- [22] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE 1547.7 – 2013**: IEEE Guide for Conducting Distribution

- Impact Studies for Distributed Resource Interconnection. IEEE, 2013.
- [23] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE P1547.8 – 2021**: IEEE Recommended Practice for Establishing Methods and Procedures that Provide Supplemental Support for Implementation Strategies for Expanded Use of IEEE Standard 1547. IEEE Draft, 2021
- [24] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., **IEEE C37.95 – 2014**: IEEE Guide for Protective Relaying of Utility-Consumer Interconnections. IEEE, 2014.
- [25] BARRETO, Gustavo de Andrade. **Metodologia de aplicação de geração distribuída fotovoltaica em baixa tensão nos reticulados subterrâneos das distribuidoras de energia elétrica**. 2014. Tese (Doutorado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [26] UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Apostila. **Sistema De Distribuição: Aspectos Gerais De Sistema De Distribuição**. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/apostila_sdee_01, acesso em 20 de Julho, 2023.