



ESTUDO DE SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM REDES COM CONTEÚDO HARMÓNICO: IMPACTO NAS PROTEÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

LEONARDO LIPINSKI

julho de 2025

**ESTUDO DE SATURAÇÃO DE TRANSFORMADORES
DE CORRENTE EM REDES COM CONTEÚDO
HARMÓNICO: IMPACTO NAS PROTEÇÕES DE
SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

Leonardo Lipinski

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica
Sistemas Eléctricos de Energia**

Orientador: Professor Doutor Rui Brito

Júri:

Presidente:

Professor Doutor Fernando Maurício Teixeira de Sousa Dias, Professor Adjunto, DEE/ISEP

Vogais:

Professor Doutor Rui Miguel Monteiro De Brito, Professor Adjunto, DEE/ISEP

Professor Doutor José António Beleza Carvalho, Professor Coordenador, DEE/ISEP

Resumo

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias, denominados BESS (da sigla em língua inglesa *Battery Energy Storage Systems*) desempenham fundamental papel na transição energética como meio de estabilização da potência fornecida por fontes de energia renováveis.

Composto essencialmente por eletrónica de potência ativa, os PCS (do Inglês *Power Conversion System*) são conversores bidirecionais que realizam a conversão de corrente alternada para contínua, durante o processo de carregamento das baterias e também de contínua para alternada durante o processo de injeção de potência das baterias para a rede.

Sua proteção, baseada em relés eletrónicos multifunções que atuam em disjuntores de média tensão, amostram os sinais de corrente destes circuitos via transformadores de corrente, que podem estar sujeitos à saturação dado o comportamento não linear destes equipamentos e sua base tecnológica (núcleos ferromagnéticos).

Como análise essencial no dimensionamento e especificação dos transformadores de corrente, se faz necessário o estudo de saturação destes equipamentos face aos níveis de curto-circuito na instalação, uma vez que é de fundamental importância garantir a correta atuação dos disjuntores e demais subsistemas de proteção associados a estes transformadores frente a um fenómeno de curto-circuito.

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento dos transformadores de corrente das celas de média tensão face ao típico conteúdo de distorção harmónica existente nos sistemas BESS, bem como, por meio numérico via utilização do software PLECS, construir uma metodologia de análise da saturação de transformadores de corrente em redes com conteúdo harmónico.

Palavras-chave: BESS, Sistemas de Armazenamento por baterias, saturação de TC's, proteção de redes de média tensão

Abstract

Battery Energy Storage Systems (BESS) play a key role in the energy transition as a means of stabilizing the power supplied by renewable energy sources.

Composed essentially of active power electronics, PCS (Power Conversion Systems) are bidirectional converters that convert alternating current to direct current during the battery charging process and from direct current to alternating current during the process of injecting power from the batteries into the grid.

Its protection, based on multifunction electronic protection relays that act on medium-voltage circuit breakers, samples the current signals from these circuits via current transformers, which can be subject to saturation given the non-linear behaviour of this equipment in the face of short-circuit phenomena.

As an essential analysis in the sizing and specification of current transformers, it is necessary to study the saturation of this equipment in relation to short-circuit levels in the installation, since it is of fundamental importance to guarantee the correct performance of the circuit breakers and other protection subsystems associated with these transformers in the face of a short-circuit event, given the non-linear behaviour of this equipment and its technological basis (ferromagnetic cores).

The aim of this work is to analyse the saturation of current transformers in medium-voltage cells in the face of the typical harmonic distortion content found in BESS systems, as well as to build a methodology for analysis the saturation of current transformers in networks with harmonic content by means of numerical analysis using PLECS software.

Keywords: BESS, Battery Storage Systems, CT saturation, medium voltage grid protection.

Índice

1	Contextualização	9
1.1	Introdução.....	9
1.2	Interligação à rede de MT.....	11
1.3	Saturação dos transformadores de corrente	14
2	Objetivos e Tarefas do trabalho	16
2.1	Revisão da Literatura existente	16
2.2	Modelagem para o Cálculo de Saturação de TCs a 50 Hz:	16
2.3	Modelagem para o Cálculo de Saturação de TCs em redes com harmónicos:	16
2.4	Validação da Metodologia e conclusões.....	17
2.5	Calendarização	17
3	Estado da Arte	18
3.1	Sistemas de Armazenamento de Energia	18
3.1.1	Tecnologias para Sistemas de Armazenamento	18
3.1.2	Requisitos das redes para Sistemas de Armazenamento.....	20
3.1.3	Eletrónica de Potência para BESS integrados à rede	23
3.2	Análise da Saturação de Transformadores de Corrente	27
3.2.1	Fenómenos de Saturação.....	27
3.2.2	Circuito equivalente de um TC	30
3.2.3	Análise de desempenho de um TC	31
3.3	Outras Tecnologias para medição de corrente.....	33
3.3.1	Transformadores de corrente óticos	33
3.3.2	Bobina de Rogowski.....	34
3.3.3	Sensores de efeito Hall.....	35
3.4	Conclusão	35
4	Modelos e Simulações	36
4.1	Modelagem do transformador saturável	36
4.2	Modelização do conteúdo harmónico dos sistemas BESS e da corrente de curto-circuito	39
4.3	Análises da saturação.....	44
4.3.1	Análise sem conteúdo harmónico	45
4.3.2	Análise com conteúdo harmónico.....	47
4.3.3	Análise comparativa - conteúdo harmónico x rede sinusoidal pura.....	49
5	Conclusão	53

Lista de Figuras

Figura 1 – Sistema BESS associado a uma central de produção solar [1]	9
Figura 2 – Diagrama Unifilar de um sistema BESS.	10
Figura 3: Interconexão entre PBs e agregação de potência dos circuitos de MT.	11
Figura 4: Relé de Proteção Eletrónico Multifunções P5F30 [2].	12
Figura 5: Cella de MT de agregação de potência dos circuitos BESS.	13
Figura 6: Transformadores de corrente 1000 / 5 A 36kV [2]	13
Figura 7: Formas de ligação dos transformadores de medida ao relé de proteção [2].	14
Figura 8: Resumo das tecnologias de armazenamento de energia[4].....	19
Figura 9: Aplicações dos Sistemas de Armazenamento de Energia [3].	21
Figura 10: Categoria de conversores para interface com a rede [3].....	24
Figura 11: Conversor de dois níveis convencional tipicamente aplicado em sistemas BESS [3].	24
Figura 12: Exemplos de IGBTs ligados em série conectados diretamente à rede de MT usando um conversor de dois níveis [3].	25
Figura 13: MMC e os correspondentes sub-módulos: Baterias centralizadas no link-DC (a), Baterias distribuídas nos sub-módulos (b) [3].	26
Figura 14: Princípio de funcionamento do TC [12].	27
Figura 15: Exemplo de curva B x H [12].	28
Figura 16: Diferentes tipos de saturação de um TC [14].....	29
Figura 17: Ciclos de Histerese, corrente primária e corrente secundária em diferentes estágios de saturação [14].	29
Figura 18: Circuito equivalente de um transformador de corrente [15].	30
Figura 19: Exemplo de gráfico de excitação [12].	31
Figura 20: Componentes de uma corrente de curto-circuito [15].	32
Figura 21: Típica placa de efeito Hall transdução corrente à campo magnético [18].	35
Figura 22: Modelo do transformador de 2 enrolamentos saturável.	36
Figura 23: Elementos do modelo do transformador saturável.....	37
Figura 24: Curva de Saturação do TC 2500/5-5A [19].....	38
Figura 25: Distorção harmónica de corrente numa das fases durante o processo de descarga da bateria [20].....	40
Figura 26: Recurso onda sinusoidal distorcida em PLECS.	41
Figura 27: Forma de onda resultante.....	41
Figura 28: Análise de Fourier do sinal resultante	41
Figura 29: Modelo corrente de assimétrica somado com sinusoide distorcida	43
Figura 30: Forma de onda resultante.....	43
Figura 31: Estrutura do transformador com instrumentação conectada.....	45
Figura 32: Modelo completo Forma de onda sem conteúdo harmónico.....	45
Figura 33: Formas de onda de corrente sem conteúdo harmónico.	46
Figura 34: Detalhe do fim da saturação do núcleo.	47
Figura 35: Modelo completo Forma de onda com conteúdo harmónico.....	48

Figura 36: Formas de onda de corrente com conteúdo harmónico.	48
Figura 37 Detalhe do fim da saturação do núcleo.	49
Figura 38: Modelo integrado para comparação.....	49
Figura 39: Formas de onda das duas redes em simultâneo.....	50
Figura 40: Formas de onda secundária dos dois cenários e a subtração.....	50
Figura 41: Comparativo entre correntes secundárias - regime transitório.....	51
Figura 42: Análise transitória - primeira diferença identificada.....	51
Figura 43: Análise transitória - segunda diferença identificada.....	52
Figura 44: Análise transitória e permanente.....	52

Lista de Tabelas

Tabela 1: Indicadores-chave para cada tipo de tecnologia de armazenamento [4].....	20
Tabela 2: Dados técnicos do transformador de corrente utilizado [19].....	38

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CAES	<i>Compressed-Air-Energy Storage</i>
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
CT	<i>Current Transformer</i>
EMC	<i>Electromagnetic compatibility</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
ESS	<i>Energy Storage System</i>
FAT	<i>Factory Acceptance Test</i>
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i>
MMC	<i>Modular Multilevel Converter</i>
MT	Média Tensão
NPC	<i>Neutral-point clamped</i>
OCT	<i>Optical Current Transformer</i>
PCS	<i>Power Conversion System</i>
PB	<i>Power Block</i>
PHS	<i>Pumped Hidro Storage</i>
PMS	<i>Power Management System</i>
TAF	Testes de Aceitação de Fábrica
TC	Transformador de corrente
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>

1 Contextualização

1.1 Introdução

Os Sistemas de armazenamento de energia por baterias, conhecidos pelo acrónimo BESS (da língua inglesa *Battery Energy Storage Systems*) consistem em uma técnica para armazenamento de energia associada principalmente às fontes de produção renováveis, que tem como entre vários objetivos armazenar energia durante os períodos de maior produção e menor procura e injetar potência para a rede durante os horários de maior procura. A Figura 1 representa o modelo de um sistema BESS associado à uma planta de produção de energia solar fotovoltaica.

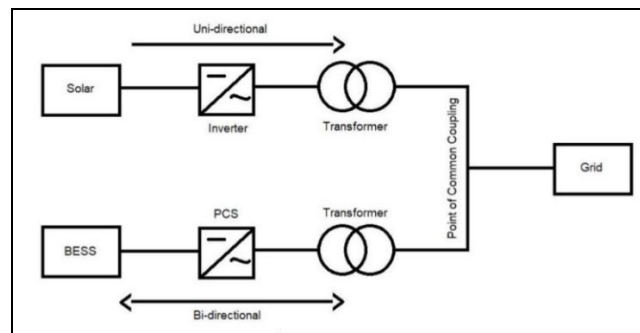


Figura 1 – Sistema BESS associado a uma central de produção solar [1]

A característica bidirecional dos sistemas BESS está associada aos conversores tipo VSC (*Voltage Source Converters*) que possuem a capacidade de converter corrente contínua em alternada (processo de inversão) e também corrente alternada em contínua (processo de retificação).

Estes conversores fazem parte do conjunto de equipamentos e subsistemas agregados ao PCS (*Power Conversion System*). Que tem como função além de realizar a conversão bidirecional de energia, gerir os ciclos de carga e descarga das baterias, bem como injeção de potência reativa, entre outros parâmetros atribuídos ao PMS (*Power Management System*) dos sistemas BESS.

Os transformadores da Figura 1 são responsáveis pela adequação dos níveis de tensão, cujo sentido é adequar a baixa tensão produzida (800V trifásicos) para os níveis nominais da rede de média tensão existente (33kV trifásicos por exemplo).

O fluxo de potência nos sistemas BESS é controlado pelo PCS em conjunto com o EMS (*Energy Management System*), cujo principal objetivo é armazenar o excedente de energia produzido e injetar para a rede nas horas de maior procura.

A Figura 2 representa a estrutura típica de um PCS contendo 8 módulos de baterias (cada um com 2752 kWh) 2 inversores de 2MVA cada e um transformador elevador / rebaixador, com relação de transformação 33 / 0,8 kV.

Um sistema PCS que engloba 8 conjuntos de baterias, 2 inversores e um transformador, tipicamente atribui-se o nome de *Power Block* (PB). As imagens 2 e 3 são retiradas de um projeto interno da CJR Renewables aplicadas em um contexto de engenharia de detalhes para implementação de um sistema BESS.

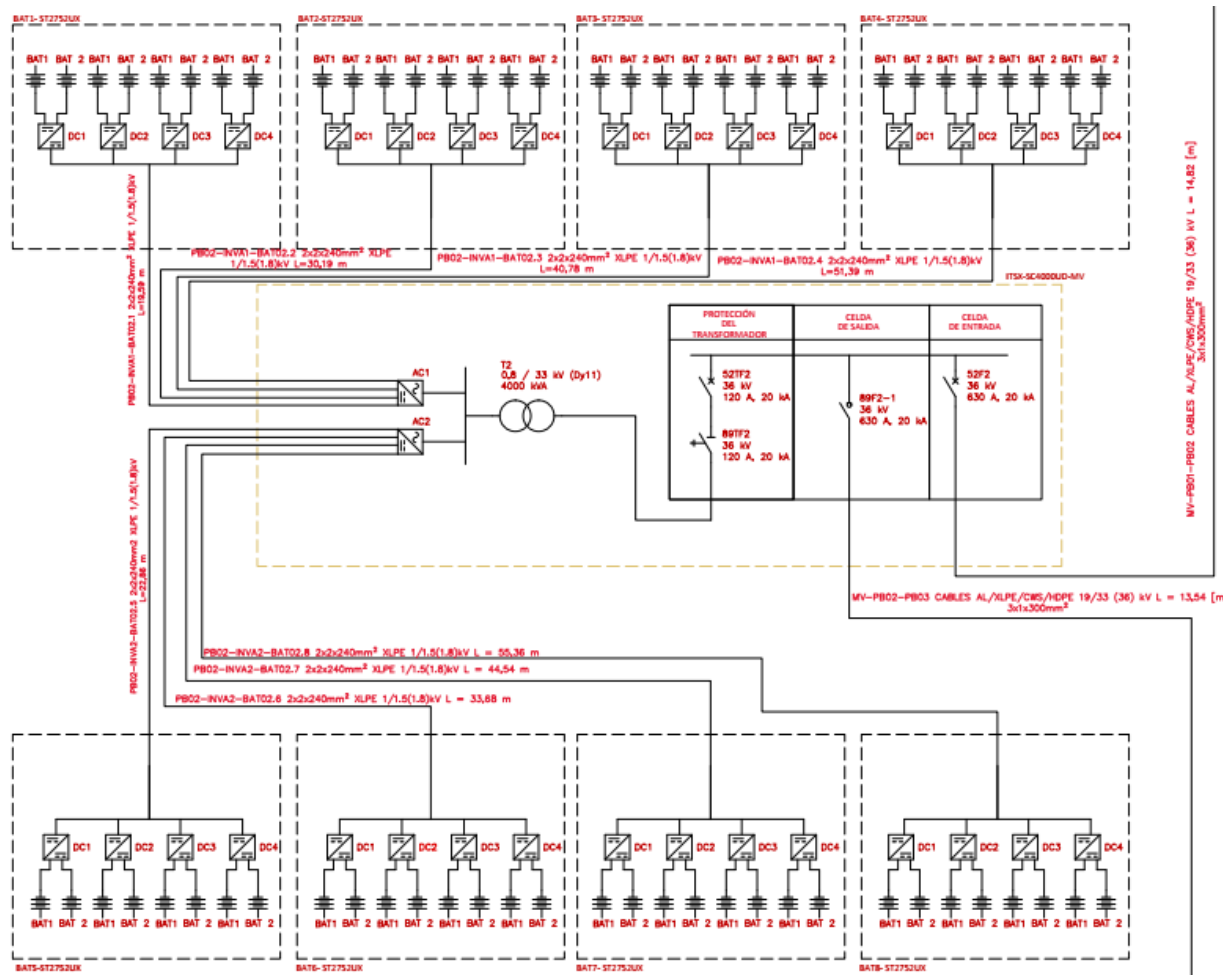


Figura 2 – Diagrama Unifilar de um sistema BESS. Fonte: CJR Renewables.

Cada inversor possui uma potência nominal de 2MVA, sendo que cada *Power Block* (PB) é composto por 2 inversores, totalizando 4 MVA para cada *Power Block*. Como dito anteriormente, o inversor tem a capacidade de operar de forma bidirecional.

Os inversores convertem a tensão em contínua ou alternada (depende do fluxo de potência) e há a presença de um transformador, que eleva a tensão de 800 V para 33kV.

Da saída destes inversores existe a interligação de 4 *Power Blocks* totalizando uma potência de 16 MVA por circuito de Média Tensão.

A Figura 3 representa 3 circuitos com a interligação de 4 *Power Blocks*, totalizando nesta aplicação, uma potência de 16 MVA por cada circuito de Média Tensão.

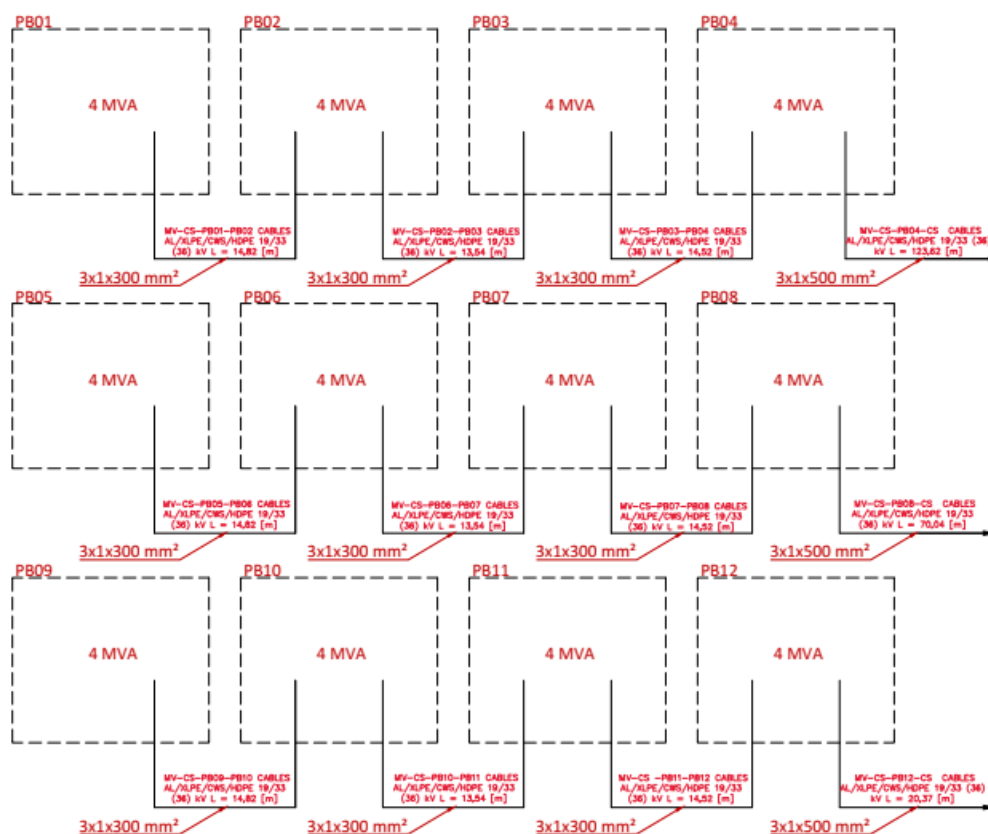


Figura 3: Interconexão entre PBs e agregação de potência dos circuitos de MT. Fonte: CJR Renewables.

1.2 Interligação à rede de MT

Para a interligação com a rede de média tensão, os circuitos de MT, designados na Figura 3, são interligados à rede de Média Tensão existente por meio de Celas de Média Tensão.

Estas Celas de MT são compostas, entre outros componentes por disjuntores de MT (que possuem a capacidade de abrir e fechar os circuitos em carga) elementos de interligação dos barramentos de MT à terra (por questões de segurança durante a operação e manutenção destas redes) bem como, relés eletrônicos multifunções que tem como função principal, ler os valores de tensão e corrente dos circuitos de MT (por intermédio de Transformadores de Corrente e de Potencial, respetivamente).

A Figura 4 representa um típico relé de proteção utilizado em uma Cella de Média Tensão:



Figura 4: Relé de Proteção Eletrónico Multifunções P5F30 [2].

As funções de proteção de acordo com as tabelas ANSI estão todas disponíveis neste tipo de dispositivo, sendo necessário a programação destes relés, bem como, o ajuste das curvas de disparo baseados nos estudos de coordenação de proteções dos circuitos de MT até a subestação existente.

A tabela das funções de proteção ANSI apresenta uma codificação normalizada e implementada de forma transversal em todos os relés de proteção, independentemente do fabricante. Cada código (composto por um numeral e/ou letra) representa uma função de proteção.

Por possuírem grande capacidade de processamento, e também de comunicação com sistemas de supervisão, os relés além da proteção local podem também efetuar manobras de abertura e fecho dos disjuntores remotamente, tipicamente via Protocolos de comunicação que estão encapsulados sobre o protocolo Ethernet, como por exemplo o protocolo IEC 61850, tipicamente utilizado e muito difundido no meio de controlo e proteção de subestações.

Devido ao elevado nível de interferência eletromagnética neste tipo de ambiente onde são instalados, os relés de proteção eletrónicos são submetidos a uma série de ensaios de EMC para garantir o correto funcionamento e operabilidade face aos elevados níveis de interferências tipicamente presentes em uma subestação ou centro de corte de MT.

A Figura 5 representa a típica estrutura de uma cela de MT contendo o disjuntor, transformadores de corrente, transformadores de potencial, equipamentos de medida e relés de proteção.

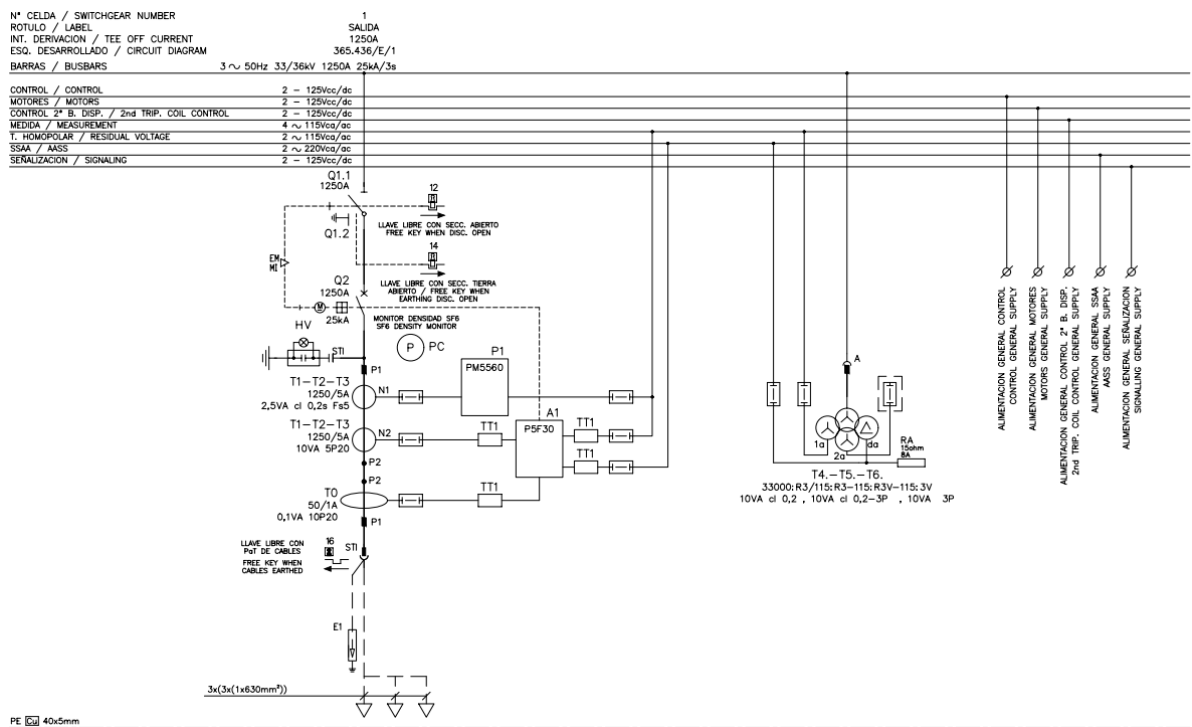


Figura 5: Cella de MT de agregação de potência dos circuitos BESS. Fonte: CJR Renewables.

Dado os grandes valores de corrente dos circuitos de MT (que podem chegar a milhares de amperes, dependendo da aplicação) os valores de corrente do barramento de MT são entregues ao relé mediante redução via transformadores de corrente (TCs) que rebaixam os valores das correntes primárias para valores nominais máximos de 1 ou 5 Ampéres no enrolamento secundário (padrão utilizado neste tipo de aplicações).

A figura 6 representa os típicos transformadores de instrumentação utilizados em celas de MT.



Figura 6: Transformadores de corrente e potencial [2].

1.3 Saturação dos transformadores de corrente

Os relés de proteção eletrónicos como exemplo da Figura 4, recebem os sinais de corrente proporcionais aos valores do enrolamento primário, com base na sua relação de transformação.

A Figura 7 representa a típica ligação entre o secundário do transformador de corrente e o equipamento de proteção, responsável pela atuação de abertura do disjuntor durante um fenómeno de sobrecarga e/ou curto-circuito.

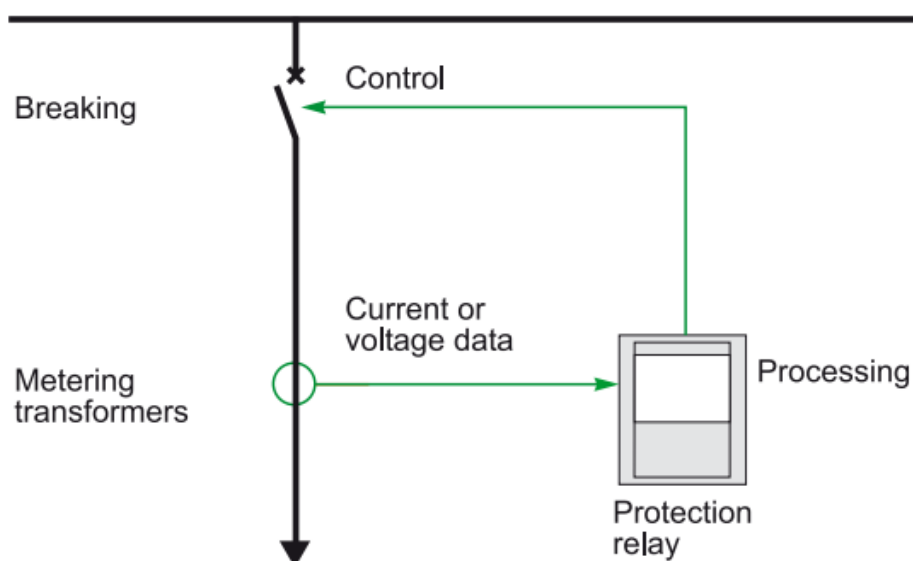


Figura 7: Formas de ligação do transformador de corrente ao relé de proteção [2].

No desenvolvimento do projeto e especificação destes sistemas, é de fundamental importância desenvolver o estudo e cálculo do ponto de saturação dos transformadores de corrente de forma a garantir o correto funcionamento das proteções durante um fenómeno de curto-circuito, por exemplo.

Dadas as grandes correntes que podem circular pelo enrolamento primário durante um evento de curto-circuito (podendo atingir dezenas de Quilo Ampéres de pico) e levando em consideração o comportamento não linear dos transformadores de corrente, em função da sua construção e estrutura ferro magnética, os transformadores podem entrar em região de saturação.

A saturação do transformador pode representar um grande risco para a proteção dos sistemas de média tensão, pois estando saturado, o transformador pode não enviar ao relé de proteção a informação correta referente ao nível de corrente do enrolamento primário, podendo em último recurso não garantir a atuação das proteções durante um fenómeno de sobrecorrente e/ou curto-circuito, o que pode representar grandes prejuízos económicos e não só.

Os transformadores de corrente possuem uma região linear de operação, que significa que a relação de transformação se mantém constante nesta zona a depender do ciclo de histerese do núcleo.

Por exemplo: Se no enrolamento primário, circula uma corrente de 2500 A, no enrolamento secundário circula uma corrente de 5 A, para um transformador de relação 2500/5 A.

Para o mesmo transformador, se no enrolamento primário, circula uma corrente de 1250 A, no enrolamento secundário circula uma corrente de 2,5 A, ou seja, proporcional linearmente com a corrente primária.

A região de linearidade tem um limite, que está associado principalmente para correntes superiores à corrente nominal do enrolamento primário.

Por exemplo: se pelo primário do mesmo transformador circular 5000 A (duas vezes a corrente nominal), é preciso estudar, baseado na curva de saturação dos transformadores de corrente obtidas durante os Testes de Aceitação de Fábrica (TAF), se o transformador terá capacidade de fornecer 10 A no secundário, ou seja, se ainda está dentro da zona linear da curva ou se já chegou no ponto de saturação.

Este estudo tem vindo a ser realizado pela empresa (CJR Renewables) de forma analítica e somente utilizando a componente da frequência fundamental de 50 Hz.

Dada a componente de alta frequência e o conteúdo harmónico existente nos sistemas BESS, provenientes da eletrónica comutada dos PCS, se faz necessária a realização do estudo de saturação dos TCs levando em consideração este conteúdo harmónico, que tem significativa influência sobre as reatâncias e impedâncias dos TCs.

Por muito que existam normativas internacionais referente ao máximo conteúdo harmónico existente na rede no âmbito da qualidade de energia, como por exemplo a EN 50160 - *Voltage Characteristics of Public Distribution Systems*, qualquer componente de frequência diferente da fundamental (50 Hz) pode resultar em alterações nos parâmetros do circuito equivalente do TC, e a análise do impacto destas frequências sobre o estudo de saturação destes equipamentos, será o alcance principal deste projeto.

2 Objetivos e Tarefas do trabalho

Apresentado e contextualizado o tema, e entendendo a problemática aqui envolvida, este trabalho tem como objetivos a criação de um modelo de simulação de um transformador de corrente, contendo todas as não idealidades envolvidas, principalmente no núcleo ferromagnético de forma a validar as curvas de saturação de um transformador real, bem como, analisar o comportamento deste mesmo transformador frente a uma rede com conteúdos harmônicos típicos existentes em sistemas BESS.

Entre as tarefas a serem desenvolvidas neste trabalho, podem ser detalhadas as seguintes:

2.1 Revisão da Literatura existente

Por se tratar de um assunto relativamente novo, o primeiro objetivo do trabalho consiste em realizar a revisão da literatura existente sobre o tema, tanto de sistemas BESS quanto de transformadores de instrumentação com enfoque nos transformadores de corrente, além das tecnologias de proteção de sistemas elétricos e redes de média tensão.

Serão considerados como literatura de base as referências mais recentes dos diretórios da IEEE, Science Direct, entre outros repositórios de reconhecimento no meio científico, além de dissertações de mestrado e teses de doutoramento sobre os temas correlatos.

2.2 Modelagem para o Cálculo de Saturação de TCs a 50 Hz:

Com base na literatura existente, apresentar o método atual e mais difundido para cálculo de saturação dos transformadores de corrente aplicados a sistemas de média tensão, definindo as principais equações, grandezas envolvidas e dados de entrada baseados nos testes de tipo e rotina destes equipamentos.

Partindo do circuito equivalente do transformador de corrente, apresentar uma análise do circuito e das impedâncias envolvidas, utilizando o software PLECS, para compreender quais serão as principais grandezas elétricas do circuito equivalente a ter impacto na presença de conteúdo harmônico.

2.3 Modelagem para o Cálculo de Saturação de TCs em redes com harmônicos:

Após compreender o circuito elétrico equivalente de um transformador de corrente, bem como, validada a análise e a metodologia de cálculo para a sua saturação, deve ser criado um perfil de

conteúdo harmónico tipicamente existente em sistemas de eletrónica de potência comutada baseado em software PLECS, para verificar os impactos sobre a curva de saturação de transformadores de corrente neste tipo de rede.

Paralelamente, é feita a análise do circuito eléctrico equivalente e as alterações das impedâncias características do transformados quando sujeito a este tipo de fenómeno.

2.4 Validação da Metodologia e conclusões

Como principal objetivo deste trabalho, uma vez que está ligada a uma das necessidades da empresa CJR Renewables, é criada e listada uma metodologia de verificação da saturação, seja de forma analítica (folha de cálculo em Excel) seja com a criação de um modelo de simulação via software PLECS para aplicação em projetos futuros.

Paralelamente, foi apresentada a metodologia atual que a empresa adota para estes estudos de saturação de transformadores e validação junto aos fornecedores e clientes, de forma a possibilitar criar melhorias neste processo de Engenharia.

2.5 Calendarização

A etapa de modelagem para cálculo de saturação do TC na frequência de 50 Hz sem a presença de harmónicos (tópico 2.2) foi desenvolvida entre 10/02/2025 à 28/02/2025.

A etapa de modelagem para cálculo de saturação do TC em redes com conteúdo harmónico (utilizando o software PLECS – tópico 2.3) foi realizada no período compreendido entre 03/03/2025 à 05/05/2025.

Paralelamente a estas 2 etapas, foi realizado o desenvolvimento da dissertação de mestrado, com o objetivo de não acumular a tarefa de compilação das informações apenas na fase final de entrega.

3 Estado da Arte

3.1 Sistemas de Armazenamento de Energia

Os sistemas de Armazenamento de Energia (do acrónimo da língua inglesa ESS – *Energy Storage System*) apresentam constante crescimento nos sistemas elétricos de energia, como alternativas para manter a estabilidade da rede elétrica e principalmente, conseguir suprir as características aleatórias das fontes de produção de energia solar e eólica. Estes sistemas desempenham fundamental papel no processo de transição energética, sendo a alternativa técnica mais madura para viabilizar a inativação de fontes de energia não renováveis para cumprir com as metas internacionais de energia e clima.

Todo sistema de armazenamento de energia (ESS) passa por um ciclo de carga e descarga com um equilíbrio de energia de longo prazo necessário entre a carga e a descarga para a operação estável e sustentável do sistema. A energia armazenada na terra como combustíveis fósseis ao longo de milhões de anos não é exceção a isto. O problema com a atual taxa de utilização não é apenas o esgotamento inevitável deste valioso recurso (com as atuais taxas de produção baseadas nos recursos conhecidos em 2020, estima-se que o petróleo e o gás devam durar 50 e 49 anos, respetivamente, enquanto o carvão se esgotará ao fim de 139 anos [3]).

Por conseguinte, é necessário alterar urgentemente a forma como a sociedade utiliza este ESS natural, reduzindo drasticamente a taxa de descarga (queimar menos combustíveis fósseis) e aumentando a taxa de carregamento (plantar mais árvores) para restaurar o equilíbrio natural. Para o conseguir, é claro que é necessário utilizar outras fontes de energia [3].

As redes de energia elétrica funcionam com um delicado equilíbrio entre a produção e o consumo. Convencionalmente, a produção era flexível para acompanhar a procura de carga.

No entanto, dada a natureza intermitente e descontrolada da produção de energia renovável, as redes elétricas terão de confiar cada vez mais nos ESS para preservar o equilíbrio do funcionamento [3].

3.1.1 Tecnologias para Sistemas de Armazenamento

De acordo com a literatura revisada, os sistemas de armazenamento de energia podem ser divididos nas seguintes tecnologias:

Mecânica: Nesta categoria, a armazenagem hidroelétrica por bombagem (PHS) é uma das mais antigas, mais populares e mais maduras de armazenamento de energia, que remonta à década de 1920 e representa atualmente mais de 90% da capacidade de armazenamento de energia de acordo com a associação nuclear mundial. A armazenagem por bombagem está

normalmente associada a barragens hidroelétricas estabelecidas nos rios, onde a água é bombeada para uma barragem de armazenamento elevada. No entanto, é também possível utilizar grandes cavernas subterrâneas para fins de PHS. Essas cavernas geológicas ou minas antigas são adequadas para utilização no armazenamento de energia por ar comprimido (CAES) também. A CAES funciona segundo um princípio semelhante ao do PHS, ou seja, acionando uma turbina através da energia potencial armazenada [3].

Térmica: Um exemplo notável de armazenamento térmico para produção de eletricidade é a central de energia solar concentrada (CSP). A CSP funciona de forma semelhante a uma turbina a vapor convencional; no entanto, a fonte de calor é frequentemente sal fundido produzido pela concentração da radiação solar [3].

Elétrica: Os super condensadores e a armazenagem de energia magnética supercondutora são as duas tecnologias de armazenamento de energia elétrica. Ambas apresentam uma baixa densidade de energia e uma elevada densidade de potência. Embora a primeira tenha encontrado muitas aplicações que requerem cargas e descargas rápidas e frequentes, a relação custo-eficácia da segunda na prática é ainda discutível, uma vez que requer operação em muito baixas temperaturas.

Eletroquímica: As baterias são uma das mais diversas e em rápido crescimento da tecnologia de armazenamento de energia. A sua importância não é apenas relevante para as baterias ligadas à rede, mas também para a indústria automóvel [3].

Química: O armazenamento químico, em comparação com as tecnologias anteriormente discutidas, é único no sentido de que pode ser transportado e, devido à sua elevada capacidade energética, pode constituir uma opção de armazenamento de energia sazonal para a produção de eletricidade. Em particular, o hidrogénio está a emergir como um alvo na tecnologia de armazenamento de energia química. O processo inverso de produção de eletricidade ocorre indiretamente através de centrais elétricas convencionais de turbinas a gás ou diretamente através de células de combustível [3].

A Figura 8 representa o resumo das tecnologias de armazenamento de energia existentes.

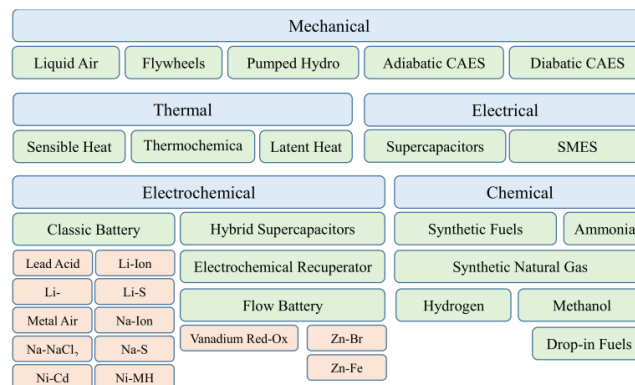


Figura 8: Resumo das tecnologias de armazenamento de energia[4].

Existem vários aspetos a serem considerados na escolha do sistema de armazenamento de energia. A Associação Europeia de Armazenamento de Energia possui indicadores chave para cada uma das tecnologias, baseada no custo de implantação, densidade de energia fornecida e armazenada, bem como ciclo de vida e eficiência.

A Tabela 1 representa o quadro comparativo entre as tecnologias.

Tabela 1: Indicadores-chave para cada tipo de tecnologia de armazenamento [4].

Tecnologia	Gama de Potência (kW)	Gama de Energia (kWh)	Custo de Potência (€/kW)	Custo de Energia (€/kWh)	Densidade de Energia	Vida útil (anos)	Ciclo de vida	Eficiência (%)
Hidrogénio	10 ⁶	10 a 10 ⁶	2000 - 5000	1-10	30 – 2550 kWh/m ³	5 – 30	N.A.	20 - 40
Condensadores	10 ³	Até 10	100 - 500	10000 - 20000	4 – 7 Wh/kg	10	10 ⁶	90
Baterias de fluxo	1 a 10 ³	10 ² a 10 ³	500 - 1300	100 - 400	10 – 25 Wh / litro	10 – 20	> 12000	70 – 75
Baterias Chumbo-ácido	10 ³	Até 10 ⁴	100 - 500	100 - 200	25 – 35 Wh/kg	5 – 15	500 - 3000	75 -85
Baterias de lítio	1 a 50x10 ³	Até 10 ⁴	150 - 1000	700 - 1300	120 – 180 Wh/kg	15 - 20	2000 - 10000	90 -98
Bombagem hídrica	10 ³ a 3x10 ⁶	Até 10 ⁸	400- 1500	40 - 150	0,5 – 3 Wh/kg	> 80	N.A.	70 -85
Aquecimento da água	400	25-320	-	15	0,08 Wh/kg	20 - 40	N.A.	70 -95

A principal consideração na escolha do tipo de tecnologia de armazenamento na rede, baseia-se principalmente numa consideração: o custo por kWh. A extração de materiais, o processamento, produção, transporte, manuseamento e montagem representam pesados encargos económicos, sendo que mais do que 60% do custo dos equipamentos associados deriva dos componentes físicos de cada tecnologia de armazenamento [3].

3.1.2 Requisitos das redes para Sistemas de Armazenamento

Os ESS acrescentam flexibilidade a toda a rede elétrica, ao serem capazes de funcionar como ativos de geração, consumo e/ou ativos de compensação de potência reativa. Fornecem uma vasta gama de serviços que cobrem todos os segmentos do fluxo de valor da energia, desde a produção, transmissão e distribuição de energia convencional e renovável até ao consumidor final [3].

A Figura 9 representa uma classificação das principais aplicações de armazenamento de energia e a sua distribuição por subsistema do Sistema Elétrico de Energia.

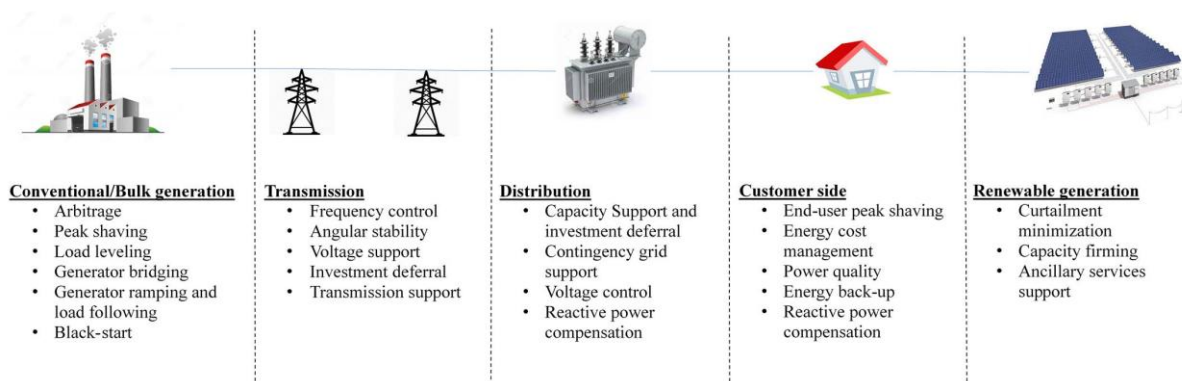


Figura 9: Aplicações dos Sistemas de Armazenamento de Energia [3].

1 – *Conventional / Bulk Generation* (Serviços de Produção Convencional / Grande Volume)

Os Sistemas de Armazenamento de Energia fornecem serviços que contribuem para otimizar a operação da geração síncrona convencional em termos de flexibilidade, eficiência e retorno económico. Os principais serviços dos ESS associados à produção convencional são os seguintes convencionais são apresentados de seguida.

Arbitragem Energética: Consiste na prática de utilizar os sistemas de armazenamento de energia para armazenar durante os horários onde o preço de energia é mais baixo, e injetar potência na rede elétrica quando os preços são mais elevados. Trata-se de um auxiliar económico que permite otimizar a rentabilização dos ativos de geração de energia.

Redução de picos de consumo (*Peak Shaving*): Tem semelhança com o princípio de arbitragem energética, pois consiste em armazenar energia durante os períodos de menor procura e injetar potência na rede durante em períodos de maior procura com o objetivo de suprir os picos de consumo de energia elétrica. A diferença em relação ao princípio de arbitragem energética é que o fator de decisão é técnico e não apenas económico. Sua principal motivação é não sobrecarregar as fontes de produção e garantir maior estabilidade na rede.

Nivelamento de carga (*load levelling*): Possui grande semelhança com o princípio do *Peak Shaving*, entretanto, seu principal objetivo é balancear as cargas de forma a evitar os picos (linearização dos consumos visto pela fonte produtora).

Ponte entre geradores (*generator bridging*): Esta prática consiste em utilizar os sistemas de armazenamento como fonte redundante durante a transferência de carga entre geradores. Este princípio apresenta grande utilidade, principalmente no sentido de manter a estabilidade da rede (em amplitude e frequência) durante a comutação entre geradores e/ou paragens de manutenção das máquinas, aumentando assim, a estabilidade e indicadores de qualidade das fontes produtoras.

Sistemas de suporta à rede (*generator ramping and load following*): Dada a grande capacidade de processamento e velocidade de resposta no padrão de energia produzida pelos sistemas de armazenamento de energia, comparativamente à regulação de máquinas síncronas

convencionais, esta técnica consiste utilizar os BESS como apoio às variações bruscas de carga na rede, que produziriam sem a sua existência, subtensões transitórias que além de diminuir os indicadores de qualidade de energia, podem, em último recurso, produzir o desligamento por completo da central produtora devido à atuação das proteções de subtensão tipicamente implementadas (ANSI 27). Assim sendo, a técnica se mostra como um excelente recurso no que se refere às rampas de geradores síncronos e o acompanhamento dos perfis de cargas solicitados pela rede elétrica.

Energização no escuro (*black start*): Quando se trata de redes isoladas, como no caso das ilhas por exemplo, pode acontecer em algum momento de a central ser completamente desligada, gerando assim, um fenómeno que denominamos de apagão. Neste tipo de ocorrência, os ESS surgem como uma alternativa de reestabelecer energia inclusive para os serviços auxiliares, sendo a fonte de “ignição” para reestabelecer o sistema elétrico e as fontes de produção.

2 – *Transmission and Distribution* (Serviços de Transmissão e distribuição)

Os Sistemas de Armazenamento de Energia possuem a capacidade de funcionar também como um ativo dos sistemas de transmissão atuando nos seguintes meios:

Regulação de frequência: Podem atuar como agente de controlo de reservas para regulação primária e secundária (controlo terciário de frequência).

A regulação em frequência é um tema amplamente discutido nos sistemas elétricos de energia, uma vez que se uma fonte produtora ou linha apresenta instabilidade em frequência podem desencadear um efeito cascata da desconexão de várias linhas e fontes produtoras, produzindo interrupções de grande magnitude.

Estabilidade Angular: Consiste em aproveitar da rápida velocidade dos sistemas de armazenamento, nomeadamente dos EMS (acrónimo de *Energy Management System*) para regular o ângulo de carga para controlar os fluxos de potência em uma rede de distribuição.

Suporte em Tensão: Dada a capacidade dos sistemas em injetar potência reativa capacitiva, o suporte em tensão consiste na utilização deste recurso como meio de regulação de tensão via compensação de reativos em nós das redes de transmissão e distribuição.

Amortização no investimento em novas linhas: Com o recurso de ser equivalente a uma fonte produtora descentralizada, os ESS surgem também como uma medida de desfasamento nas obras e projetos de ampliação de linhas e infraestruturas de transmissão. Esta análise está diretamente relacionada com os estudos de tempo de retorno de investimento (ROI) e viabilidade económica do projeto, considerando os tempos estimados de vida útil detalhados na Tabela 1.

Suporte na Transmissão: Refere-se à capacidade dos ESS de melhorar o funcionamento da rede de transporte durante perturbações, tais como afundamentos de tensão, oscilações sub síncronas locais e inter-áreas, ou instabilidades de tensão, entre outros [3].

Compensação de Potência reativa – Refere-se à utilização dos ESS como elemento balanceador das potências reativas e fator de potência na rede [5]. O controlo do fator de potência, além de apresentar um ganho direto na estabilidade em tensão, representa menores perdas de potência nas linhas por efeito Joule em função da diminuição da corrente total do circuito.

3 – *Customer Services* (Serviços ao cliente)

Os ESS são também utilizados em aplicações de gestão da energia destinadas principalmente a melhorar a qualidade e a fiabilidade da energia fornecida ao cliente final e reduzir os custos com eletricidade [3].

Peak Shaving do utilizador final: Refere-se à prática de utilização de ESS pelos clientes para suavizar o seu próprio pico de procura, contribuindo assim para reduzir a parte do custo que é fixa de acordo com a maior procura de energia [6].

Qualidade de energia: As flutuações da potência produzida, atribuídas principalmente à variabilidade dos recursos primários renováveis, causam problemas de qualidade da energia, conduzindo principalmente a variações de tensão e harmónicas. Os ESS podem ser utilizados para atenuar estas flutuações de energia, contribuindo assim para melhorar a qualidade da energia e atenuar as perturbações nas cargas dos clientes [7].

Continuidade do serviço (Energy Backup) Refere-se à utilização de ESS para substituir a função da rede elétrica após uma interrupção, impedindo assim a ocorrência de cargas críticas sejam afetadas por apagões [8].

3.1.3 Eletrónica de Potência para BESS integrados à rede

Tal como referido na secção 3.1.1, as tecnologias BESS produzem diretamente tensão contínua. Os conversores eletrónicos de potência são então para fazer a interface entre esta baixa tensão DC e a média tensão AC da rede elétrica [3]. Nesta secção, algumas das tecnologias de conversão populares, como se mostra na Figura 10, são discutidas.

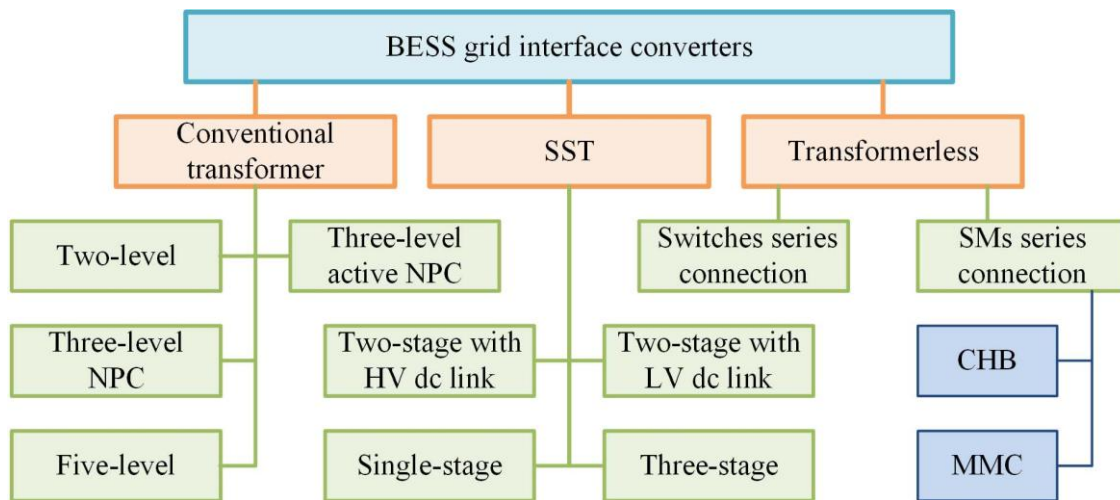


Figura 10: Categoria de conversores para interface com a rede [3].

1 – Interface baseada em transformadores de baixa frequência.

No inversor convencional ligado à rede para aplicações BESS, é utilizado um transformador para aumentar a tensão de centenas de volts para níveis de média tensão, ou seja, dezenas de quilovolts. Muitas baterias e os respectivos inversores associados podem ser ligados em paralelo no barramento DC de baixa tensão (BT) para criar BESS de grande escala com potências nominais de dezenas de Megawatts. Pode ser adicionado outro estágio de transformador para ligação a um nível de tensão mais elevado, ou seja, 66 kV e superior. Além disso, a utilização de um estágio DC-AC de dois níveis exige um transformador elevador volumoso, com perdas e dispendioso para a rede de média tensão [3]. A Figura 11 representa um conversor convencional de dois níveis utilizado em sistemas BESS e com recurso de transformador de linha para elevação de tensão.

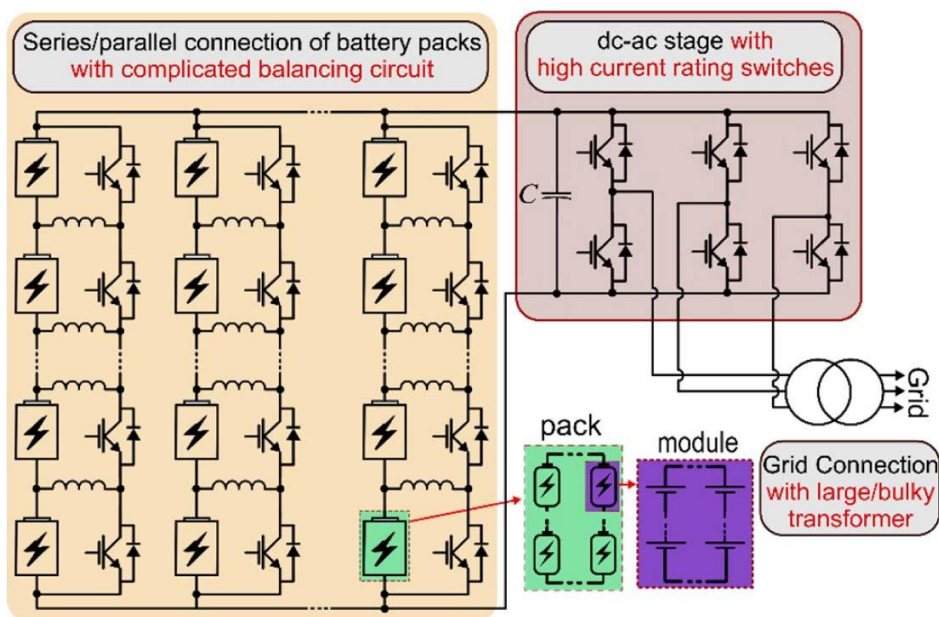


Figura 11: Conversor de dois níveis convencional tipicamente aplicado em sistemas BESS [3].

As topologias alternativas ao bem estabelecido conversor de dois níveis para aplicações BESS, incluem o conversor de três níveis, o conversor NPC (*neutral-point clamped*) ativo, e o conversor de condensador voador de três níveis (*three-level flying capacitor*) [3].

A conceção do controlo e as técnicas de modulação para estes conversores são mais complicadas do que o conversor de dois níveis convencionais [9], no entanto, proporcionam um grau de liberdade adicional para aumentar a magnitude da tensão de saída do conversor e melhorar o desempenho harmónico. Existe um compromisso para diferentes tipos de conversores monolíticos multinível entre o aumento da potência de silício instalada, a complexidade mecânica e o desempenho harmónico [10].

2 – Interfaces sem transformador:

O transformador de baixa frequência (industrial /50 Hz) utilizado nos inversores dos sistemas BESS descritos anteriormente são volumosos, com elevadas perdas e caros. Para evitar a utilização de um transformador de baixa frequência, foram desenvolvidas soluções BESS à escala dos serviços públicos (*utility-scale*) [10]. Estas soluções podem ser classificadas em duas categorias principais: Semicondutores em série ou sub módulos em série [3].

Semicondutores em série: Para a ligação direta à rede de média tensão, podem ainda ser utilizadas muitas topologias de conversores de dois ou três níveis. Um exemplo utilizando um conversor de dois níveis é apresentado na Figura 12. Em comparação com a Figura 11, vários IGBTs são ligados em série, uma vez que um único IGBT com uma tensão nominal de alguns quilovolts (por exemplo, 1,7-6,5 kV) não é capaz de bloquear a tensão necessária no link DC. No entanto, alguns inconvenientes desta abordagem incluem implicações para a construção física dos conversores com muitos dispositivos de comutação ligados em série, e a conceção específica do controlador de disparo dos semicondutores para garantir que cada dispositivo seja ligado/desligado de forma síncrona. A utilização desta topologia também exige uma baixa frequência de comutação para obter perdas de comutação aceitáveis, o que, por sua vez, implica um custo mais elevado nos sistemas de filtragem da forma de onda de tensão de saída [3].

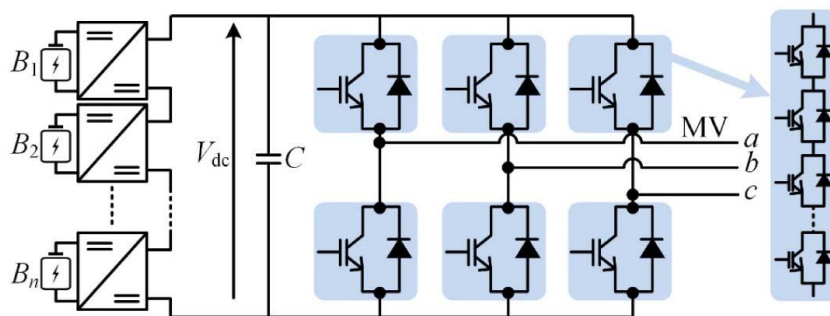


Figura 12: Exemplos de IGBTs ligados em série conectados diretamente à rede de MT usando um conversor de dois níveis [3].

Sub-módulos em série: De entre as tecnologias de sub-módulos em série, podemos citar o *Modular Multilevel Converter* (MMC). A estrutura do MMC permite a ligação dos elementos de armazenamento de energia quer diretamente ao link DC da Média Tensão ou de forma distribuída pelos sub-módulos que formam os braços dos conversores [3]. No caso de baterias centralizadas ligadas ao link DC comum do MMC, como mostra a Figura 13 (a), são necessárias longas cadeias de baterias, anulando a maioria das vantagens da estrutura em cascata; assim, a abordagem distribuída, como mostra a Figura 13 (b), representa uma implementação mais viável do MMC em aplicações BESS [3].

Quando o MMC é considerado apenas com o objetivo de ligar um BESS à rede, a complexidade/custo adicional da estrutura do MMC é superior em comparação com outras tecnologias, (seis braços em vez de três), bem como a utilização menos otimizada do conversor (o dobro do número de dispositivos de comutação para o mesmo número de níveis de tensão), colocam o MMC em desvantagem como topologia de eleição. No entanto, a integração de BESS em conversores MMC para alta tensão DC (HVDC), sistemas de acionamento de motores ou outros sistemas de apoio à rede, aumenta as funções possíveis e o valor que o conversor de potência pode fornecer nestas aplicações [11].

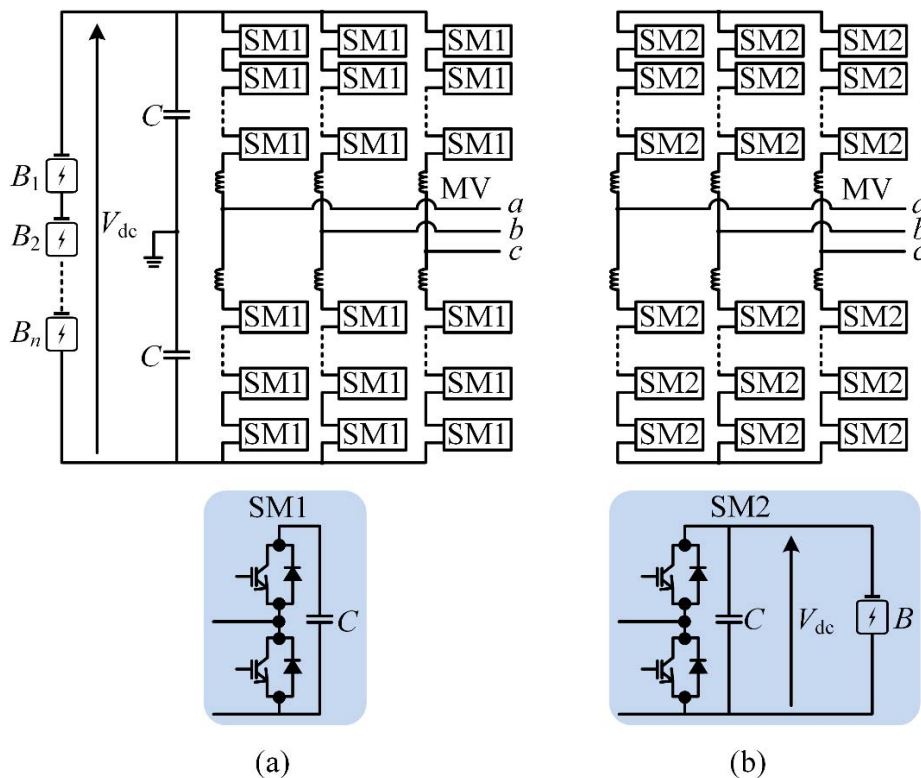


Figura 13: MMC e os correspondentes sub-módulos: Baterias centralizadas no link-DC (a), Baterias distribuídas nos sub-módulos (b) [3].

3.2 Análise da Saturação de Transformadores de Corrente

3.2.1 Fenómenos de Saturação

Para entender por que motivo o transformador de corrente satura, devemos analisar o princípio de funcionamento deste dispositivo, e o seu comportamento com as elevadas correntes primárias durante fenômenos transitórios.

Num transformador ideal, a corrente secundária que sai do TC (I_s) é uma réplica exata da corrente primária (I_p) dividida pelo rácio do número de espiras em cada enrolamento (relação de transformação do TC). No entanto, quando um TC satura, a I_s não replica com exatidão a I_p . A razão pela qual um TC satura está relacionada com o que ocorre fisicamente dentro de um TC durante o processo de magnetização do núcleo. O núcleo de ferro de um TC é constituído por um número fixo de dipolos magnéticos, que podem ser considerados como ímanes moleculares. Idealmente, estes ímanes estão dispostos aleatoriamente em polaridade em todo o núcleo, como mostra a Figura 14 [12].

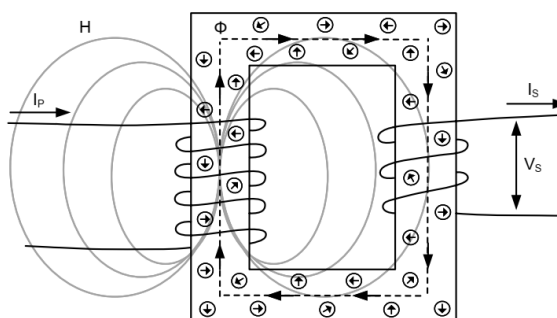


Figura 14: Princípio de funcionamento do TC [12].

Quando a corrente alternada (I_p) flui no enrolamento primário e gera a excitação magnética (H), a intensidade deste campo magnético afeta os dipolos magnéticos do núcleo e faz com que estes comecem a alinhar-se (na mesma direção que o campo magnético) para produzir o fluxo magnético (Φ). Quanto mais corrente I_p flui, mais forte se torna o campo magnético (H), e mais ímanes ficam alinhados. O número de ímanes que estão alinhados num determinado momento é a densidade de fluxo (B). Quando todos os ímanes no núcleo estão alinhados na mesma direção, a densidade máxima de fluxo do núcleo é atingida e diz-se que o núcleo do TC está saturado [12].

A relação entre a intensidade do campo magnético (H) e a densidade do fluxo magnético (B) é dada pela curva B-H do núcleo (também conhecida como curva de histerese), como mostra o exemplo da Figura 15. Diferentes tipos de materiais de núcleo têm curvas B-H diferentes, que dependem da capacidade do material para suportar um campo magnético [12].

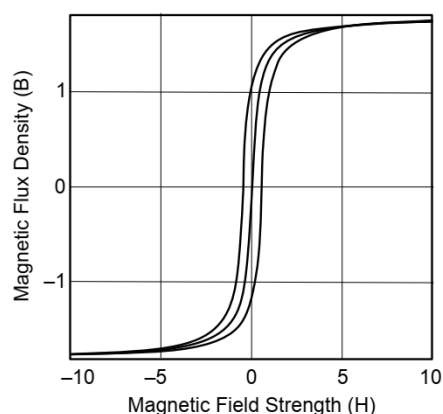


Figura 15: Exemplo de curva B x H [12].

Existem muitos fatores que afetam a saturação do transformador de corrente, entre os quais a saturação magnética do ferro é a razão fundamental para a sua saturação. A precisão da medição do transformador de corrente do barramento determina diretamente se o dispositivo de proteção (relé) pode funcionar corretamente. Em circunstâncias normais, o erro de medição do transformador de corrente é muito pequeno, que pode aproximar a mudança linear das correntes primária e secundária e assegurar o funcionamento correto do dispositivo de proteção. Quando ocorre uma falha, a sua não linearidade domina, e o erro de medição do transformador de corrente não pode ser ignorado [13].

Quando a linha exterior e próxima do barramento sofre um curto-circuito, as correntes de todas as linhas sem defeito ligadas ao barramento fluirão para a linha em falta. Devido à capacidade limitada do transformador de corrente instalado na linha de defeito, se a corrente que flui através dele for muito grande, o transformador entrará na região não-linear. O resultado é que a forma de onda da corrente secundária é distorcida, e um grande número de correntes desequilibradas existirão em diferentes circuitos [13].

O núcleo do elemento ferromagnético tem características de excitação não lineares. Durante um fenômeno de curto-circuito, o transformador de corrente pode entrar em saturação e levar a distorção da corrente secundária, interferindo com a ação correta do relé de proteção. Em particular, a corrente de curto-circuito pode ter componentes transitórias não periódicas, resultando em saturação transitória grave do TC. De acordo com a dimensão da componente da corrente aperiódica e a componente de frequência industrial (50 Hz), o tipo de saturação do transformador pode ser dividido em saturação em estado estacionário, saturação transitória e saturação transitória local, como mostra a Figura 16 [14].

A componente não periódica determina a altura do ponto de deslocamento, quanto maior a componente não periódica, mais próximo está o ponto de deslocamento da zona de saturação.

A componente de frequência industrial determina a gama de variação do fluxo magnético. Quanto maior for a componente de frequência industrial, mais severa é a transição entre a zona linear e a zona de saturação [14].

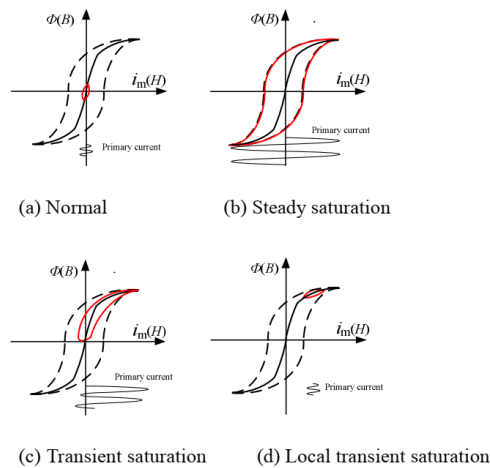


Figura 16: Diferentes tipos de saturação de um TC [14].

Quando o TC está em estado de saturação estável, existe um grande círculo simétrico de histerese, que entra e sai da zona de saturação a cada meio ciclo. A corrente secundária positiva e negativa são defeituosas e simétricas. Quando se trata de saturação transitória, o ciclo de histerese é polarizado para um lado, entra e sai da zona de saturação em cada onda. As meias ondas de corrente secundária são defeituosas e assimétricas. Quando se trata de saturação local transitória, existe um laço de histerese local. Os ciclos de histerese não se convertem entre a zona linear e a zona de saturação. A corrente secundária não é um defeito significativo. As meias ondas positivas e negativas são simétricas [14].

A Figura 17 representa os ciclos de histerese e as típicas formas de onda das correntes primárias e secundárias em um TC.

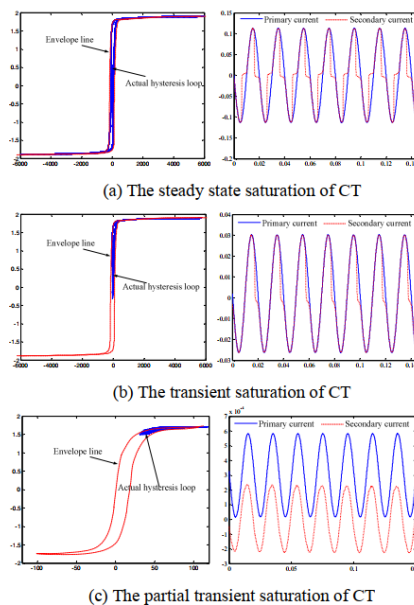


Figura 17: Ciclos de Histerese, corrente primária e corrente secundária em diferentes estágios de saturação [14].

3.2.2 Circuito equivalente de um TC

Na Figura 18, pode-se verificar o diagrama elétrico representativo de um transformador de corrente, onde R_1 e X_1 são definidas como a resistência e reatância de fugas do primário, e R_2 e X_2 são definidas como a resistência e reatância de fugas do secundário refletidas ao lado de maior corrente. Em seguida, é visto o ramo de magnetização que é caracterizado por dois parâmetros, ou seja, a resistência R_μ , a qual traduz a potência ativa de perdas no ferro, e X_μ que é responsável pela produção de fluxo mútuo do transformador [15].

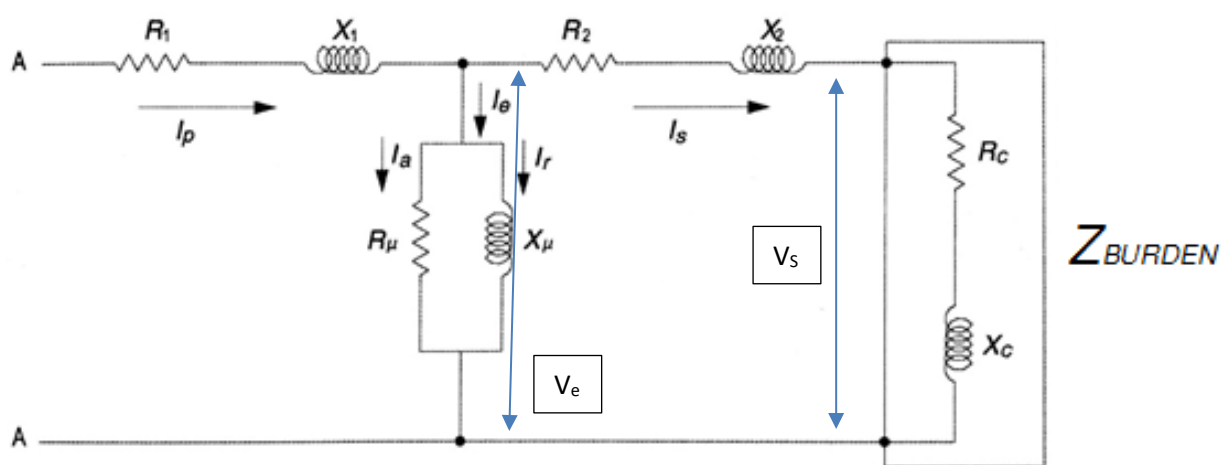


Figura 18: Circuito equivalente de um transformador de corrente [15].

Os elementos R_c e X_c representam a resistência e reatância da carga conectada aos terminais do secundário do TC, que podem ser um equipamento de medida ou um relé de proteção. A esta Impedância da carga atribui-se o nome de Z_{BURDEN} [15]. A Tensão V_e representa a força eletromotriz (F.E.M.) e V_s representa a tensão secundária.

Quando a carga está sujeita a uma corrente oriunda do enrolamento primário (I_p) do transformador de corrente, a corrente circula pelo enrolamento do secundário provocando uma queda de tensão na impedância interna ($Z_2 = R_2 + jX_2$) e na impedância da carga ($Z_C = R_C + jX_C$) que afeta o fluxo magnético do transformador e exige uma corrente magnetizante (I_e) diretamente proporcional. Logo, a corrente do enrolamento primário (I_p) é a soma das correntes do enrolamento secundário e do ramo de magnetização [15].

Entretanto, quando o núcleo está saturado, a corrente de magnetização solicitada é muito elevada, deixando de transferir parte desta corrente para a carga, ocasionando um erro de valor relevante na corrente secundária [15].

Baseado nas características do circuito equivalente do TC, bem como sabendo do comportamento não linear destes equipamentos, é de fundamental importância conhecer as técnicas e métodos de análise da sua saturação frente a um fenómeno de curto-circuito.

Ser capaz de interpretar o gráfico clássico do ponto de joelho (excitação) de um TC é uma parte integrante da compreensão da saturação de TC [12].

No entanto, por vezes é útil pensar em termos de quantidades RMS em vez de amostrar uma forma de onda ao longo do tempo. O gráfico de excitação na Figura 19 mostra a relação entre a força eletromotriz V_E e a corrente de excitação I_E de um TC em valores eficazes (RMS), que traduz o ciclo histerético do material [12].

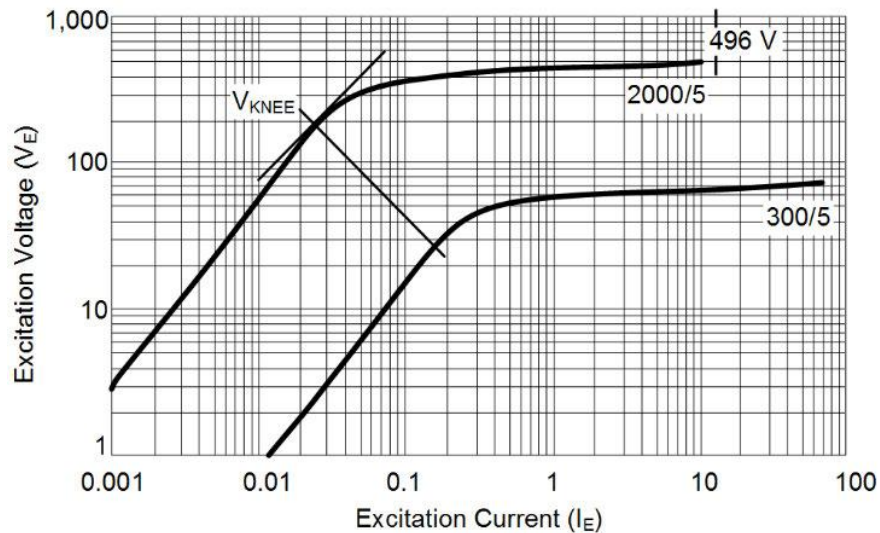


Figura 19: Exemplo de gráfico de excitação [12].

3.2.3 Análise de desempenho de um TC

1 – Análise de desempenho em regime permanente.

A equação 1 é o critério para evitar a saturação do TC para correntes de defeito simétricas. As faltas no mundo real raramente são simétricas, pelo que esta equação nunca deve ser utilizada na prática para analisar o desempenho do TC. A equação 1 pode ser utilizada para determinar a corrente de defeito máxima admissível para uma determinada carga ou a carga máxima admissível para uma dada corrente de defeito [12].

$$20 \geq \left(\frac{I_{FAULT}}{I_{PRI}} \right) * \left(\frac{Z_B + R_2}{Z_{B\ STD} + R_2} \right) \quad (1)$$

Equação 1: Análise da saturação em regime permanente [12].

Onde:

I_{FAULT} = Corrente nominal de curto-circuito no ponto (A);

I_{PRI} = Corrente nominal do enrolamento primário (A);

Z_B = É a carga total (burden) conectada ao secundário do TC (Ω) – Equipamentos + cabos;

R_2 = É a resistência interna do enrolamento secundário do TC (Ω);

Z_{BSTD} = É a carga padrão (burden) a ser conectada ao secundário do TC (Ω).

2 – Análise de desempenho durante a componente assimétrica.

Com o afastamento do ponto de curto-circuito dos terminais do gerador, a impedância acumulada das linhas de transmissão e de distribuição é tão grande em relação às impedâncias do gerador que a corrente de curto-circuito simétrica já é de regime permanente acrescida de uma componente de corrente contínua [15].

A soma da corrente de curto-circuito simétrica e da componente de corrente contínua dá origem a corrente de curto-circuito assimétrica, conforme a Figura 20. Esta componente DC da corrente primária é uma componente exponencial decrescente e, geralmente, está presente nos primeiros ciclos das correntes de curto-circuito [15].

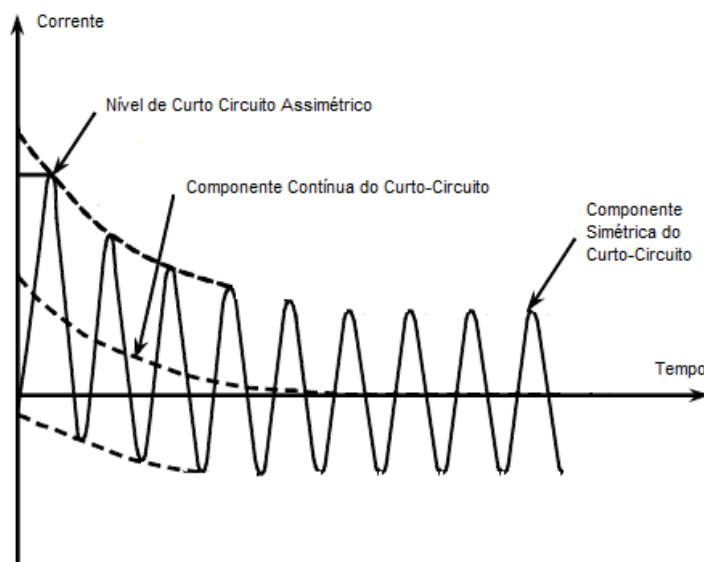


Figura 20: Componentes de uma corrente de curto-circuito [15].

As correntes de defeito com um desvio DC possuem decaimento exponencial, causado pela relação X/R do sistema e também pelo ângulo de defasamento no tempo entre a origem do defeito e a origem da tensão, e podem produzir uma saturação significativa do TC. A seleção de

TCs baseada apenas na corrente de defeito simétrica não é aconselhável porque ignora o risco de forte saturação do TC quando a corrente de defeito inclui CC [12].

Para ter em conta o desvio DC, podemos melhorar a equação (1) incluindo um termo X/R extra, resultando na equação (2). Este termo extra é o rácio X/R de todo o equivalente Thevenin do sistema, desde a da fonte ao defeito, através de um determinado TC. A equação (2) considera apenas o desvio DC da corrente de defeito sinusoidal, não o desvio de fontes não sinusoidais, como a energização do transformador (corrente de *inrush*) [12].

$$20 \geq \left(\frac{I_{FAULT}}{I_{PRI}} \right) * \left(\frac{Z_B + R_2}{Z_{B_STD} + R_2} \right) * \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \quad (2)$$

Equação 2: Análise da saturação considerando componente assimétrica [12].

A magnitude inicial do desvio DC que ocorre é determinada pelo ângulo de incidência do defeito, e o tempo que demora para que o desvio DC diminua é determinado pela relação X/R do sistema. A equação (2) é bastante conservadora e assume a pior forma de onda, completamente deslocada, o que não é frequentemente o caso no mundo real. Qualquer falha que não seja o pior caso resultará numa menor saturação. Por conseguinte, um valor superior a 20 nesta equação não significa que o TC irá saturar para essa corrente de defeito- apenas que poderia, assumindo que a corrente de defeito tinha o pior caso de offset DC [12].

3.3 Outras Tecnologias para medição de corrente

3.3.1 Transformadores de corrente óticos

Transformadores de Corrente Óticos (OCTs) são um tipo de instrumento elétrico utilizado para medir a corrente em um circuito elétrico de alta tensão. Os OCTs funcionam utilizando um sensor ótico para detetar o campo magnético ao redor do condutor que transporta a corrente elétrica [16]

O princípio básico dos sensores óticos é medir a rotação do plano de polarização da luz que se propaga através da fibra ótica. A quantidade de rotação é proporcional à intensidade do campo magnético e, ao medir o ângulo de rotação, é possível determinar com alta precisão a magnitude da corrente no circuito de alta tensão [16].

Os OCTs oferecem medições de alta precisão em uma ampla faixa dinâmica e em um extenso espectro de temperaturas. Devido à sua imunidade à saturação, os OCTs mantêm alta precisão durante eventos transitórios e permanecem inalterados pela carga efetiva dos equipamentos

secundários. Além disso, eles não impõem impacto adverso às redes secundárias, dada sua capacitância e indutância desprezíveis. O mesmo laço de fibra pode ser utilizado tanto para medição de faturação quanto para proteção, ajustando-se a taxa de amostragem. Adicionalmente, é possível incorporar múltiplos laços de fibra independentes e não interativos dentro de um único cabeçote sensor, permitindo a medição e transmissão dos mesmos valores de corrente por canais principal e de *backup* [16].

Os OCTs são utilizados em sistemas de energia elétrica, incluindo redes de transmissão e distribuição, para monitorar e controlar o fluxo de energia elétrica.

3.3.2 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é uma bobina de núcleo de ar, utilizada para medir tanto correntes alternadas quanto correntes impulsivas de alta velocidade, com base nas leis de Ampère e Faraday. Ela recebeu esse nome em homenagem ao físico alemão Walter Rogowski [17].

A característica linear da bobina de Rogowski, aliada ao uso de dispositivos eletrônicos precisos, possibilita a medição de correntes que variam desde miliamperes até Mega amperes. Além disso, o baixo custo deste dispositivo, em comparação com outros métodos de medição, torna a bobina de Rogowski uma solução apropriada para a medição de correntes transitórias de alta amplitude [17].

Historicamente, a baixa amplitude do sinal de saída era uma limitação importante nas aplicações convencionais da bobina de Rogowski, o que restringia seu uso em décadas passadas. No entanto, com os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de dispositivos de medição baseados em microprocessadores, as bobinas de Rogowski tornaram-se mais adequadas para uma variedade de aplicações [17].

Nos últimos anos, a bobina de Rogowski tem se destacado devido a várias características relevantes, que têm chamado a atenção de pesquisadores e engenheiros. Entre suas principais vantagens, destacam-se [17]:

- Suporta grandes sobrecargas sem sofrer danos permanentes;
- Mede correntes em uma ampla faixa dinâmica, sem saturação do núcleo;
- Facilidade de uso, devido à sua flexibilidade e leveza;
- Baixo custo de fabricação e manutenção;
- Natureza não intrusiva, ou seja, não consome energia do circuito principal;
- Largura de banda ampla, geralmente entre 0,1 Hz e 1 GHz, o que permite captar desde sinais lentos até transitórios de alta frequência;
- Excelente resposta a transitórios, com alta-fidelidade na reprodução de formas de onda rápidas;
- Segurança elétrica, por ser galvanicamente isolada do circuito principal.

3.3.3 Sensores de efeito Hall

Os sensores de efeito Hall fazem parte de uma família de sensores baseado nas alterações Galvanométricas. Os sensores Galvanomagnéticos baseiam-se na força de Lorentz que atua em portadores de carga em movimento para detetar o campo magnético. Os sensores podem ser agrupados consoante o efeito galvanomagnético dominante: O efeito magneto resistivo geométrico provoca uma alteração na resistividade do material ao longo do trajeto principal de portadores de carga em movimento, enquanto o efeito Hall gera uma tensão ortogonal à trajetória dos eletrões [18]. A Figura 21 representa a típica estrutura de um sensor de efeito Hall.

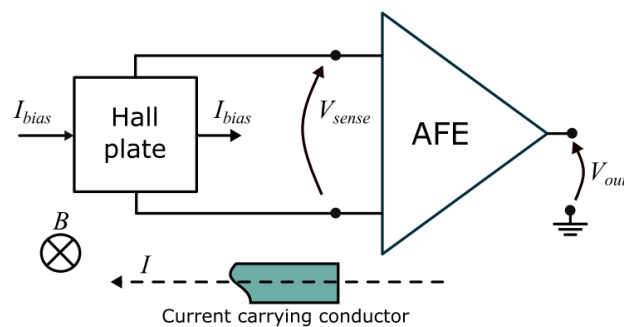


Figura 21: Típica placa de efeito Hall transdução corrente à campo magnético [18].

Apesar de algumas limitações — como baixa sensibilidade, largura de banda restrita, alto desvio intrínseco (*offset*), sensibilidade a campos magnéticos externos e variações térmicas dos parâmetros, os sensores de corrente por efeito hall destacam-se por sua natureza compacta, baixo custo, baixa dissipação de calor, alta faixa dinâmica, boa linearidade e pela capacidade de medir correntes contínuas (DC), o que os torna adequados para aplicações modernas em sistemas de potência [18].

3.4 Conclusão

Ao revisar o estado da arte foi possível identificar as principais tecnologias associadas aos sistemas de armazenamento de energia, bem como, da eletrónica de potência aplicada e associada a estes sistemas.

Foi possível revisar também os modelos matemáticos dos transformadores reais, incluindo os ciclos de histerese e os fenómenos de saturação do núcleo.

Ainda foi possível identificar as tecnologias mais recente referente aos temas da medição de corrente e instrumentação com componentes que não sofrem saturação como os tradicionais transformadores ferromagnéticos.

4 Modelos e Simulações

Para a realização da análise e estudo do fenómeno de saturação de um transformador de corrente foi utilizado o software PLECS, com a finalidade de modelizar a rede com conteúdo harmónico, bem como, medir as formas de onda de corrente e tensão.

A ferramenta permite simular sistemas eléctricos e electrónicos com características reais de componentes como motores, transformadores, semicondutores entre outro.

Além da simulação dos componentes, é possível realizar a análise de dissipação térmica, bem como, malhas de controlo analógicas e digitais, incluindo rotinas de programação.

4.1 Modelagem do transformador saturável

Entre os diversos equipamentos e sistemas possíveis de se simular no ambiente PLECS, um deles é o grupo dos transformadores, sendo disponível um grande número de configurações, grupo de conexões bem como, características reais do núcleo do transformador incluindo a saturação, alcance deste trabalho.

A Figura 22 representa o típico transformador utilizado com dois enrolamentos, bem como, os parâmetros possíveis de se alterar no modelo.

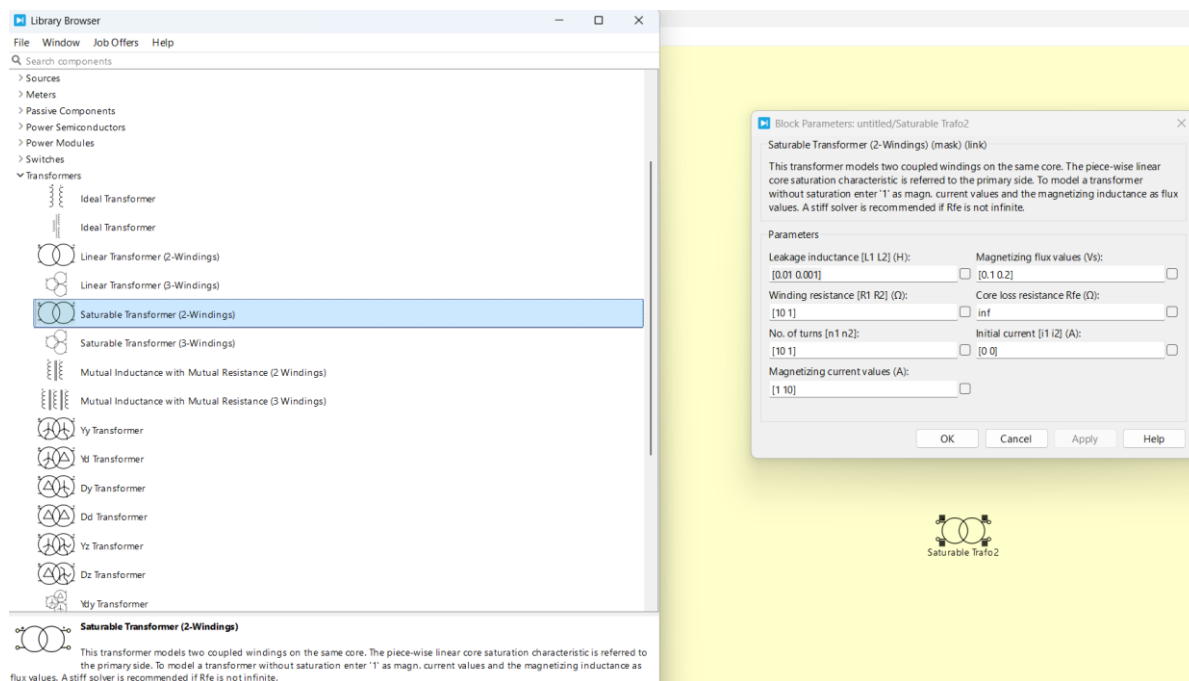


Figura 22: Modelo do transformador de 2 enrolamentos saturável.

De acordo com o manual do usuário do próprio software (função “help”) A característica de saturação do núcleo é linear por partes e é modelada usando o indutor saturável. A corrente de magnetização i_m e o fluxo Φ_m são encaminhados para o lado primário. Para modelar um transformador sem saturação, deve-se introduzir 1 como os valores da corrente de magnetização e a indutância de magnetização pretendida.

A Figura 23 representa todos os elementos que compõem o modelo do transformador real saturável, sendo:

L_1 – Indutância que traduz o fluxo de fugas do primário [Henry];

R_1 – Resistência do enrolamento primário [Ω];

L_m – Indutância de magnetização;

R_{fe} – Resistência que traduz as perdas no ferro;

$Tr1$ – Representa a polaridade dos enrolamentos e a relação de transformação;

L_2 – Indutância que traduz o fluxo de fugas do secundário [Henry];

R_2 – Resistência do enrolamento secundário [Ω];

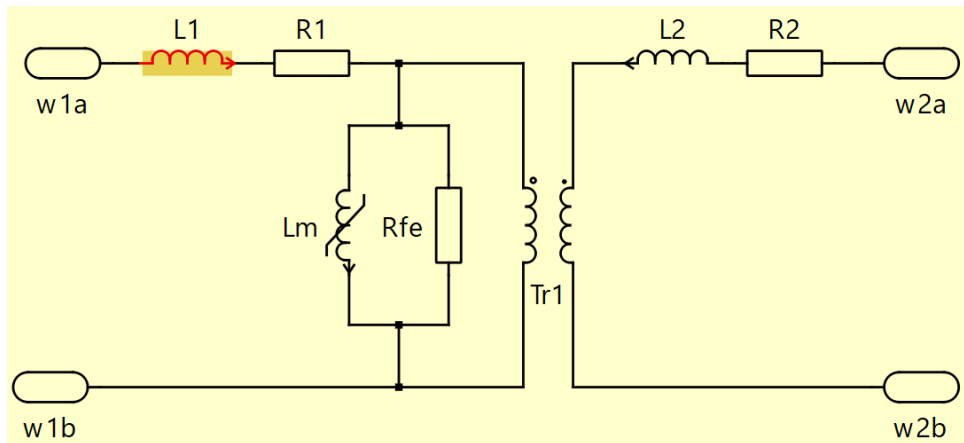


Figura 23: Elementos do modelo do transformador saturável.

Para obtenção dos parâmetros do transformador foi utilizado como referência um transformador de corrente real da marca Alce, com as seguintes características listadas na Tabela 2, provenientes do relatório do teste de aceitação de fábrica realizados em 24 de abril de 2024.

Como o relatório das provas FAT do transformador de corrente indicam apenas os valores de tensão e corrente de magnetização, e como o modelo PLECS é alimentado a partir do fluxo de magnetização e corrente, foi necessário converter os valores de tensão de magnetização em fluxo magnetizante, com base na equação 3.

$$\phi_m = \left(\frac{V_{mag}}{2 * \pi * f * n} \right) \quad (3)$$

sendo:

ϕ_m – Fluxo magnetizante [Ampère – segundo As];

V_{mag} – Tensão de magnetização [V];

f – Frequência [Hz];

n – Número de espiras do enrolamento primário;

Assim convertidos os valores de tensão em fluxo de magnetização, foi possível alimentar o modelo PLECS com os valores provenientes dos ensaios do transformador de corrente real.

Como o software utiliza muito recurso computacional para modelos com grandes vetores de entradas de corrente e fluxos, foram estabelecidos apenas 3 valores (2 na zona linear e 1 na zona já saturada) para poder alimentar o modelo de simulação, de forma que os resultados pudessem ser retirados mais rapidamente.

4.2 Modelização do conteúdo harmónico dos sistemas BESS e da corrente de curto-circuito

Para analisar o impacto do conteúdo harmónico sobre o fenómeno de saturação dos transformadores de corrente, inicialmente é preciso identificar o típico conteúdo harmónico presente nos sistemas BESS.

O Fabricante da solução (Sungrow), apresenta um relatório do estudo / análise do conteúdo harmónico produzido pelos conversores bidirecionais do sistema BESS, tanto no ciclo de carga (rede – bateria) quanto no ciclo de descarga (bateria-rede).

O estudo foi realizado para o conversor de referência modelo SC210HX, cuja potência nominal é de 210 kW.

Após análise da documentação, foi possível identificar o pior cenário para a presença de perturbações harmónicas na rede, que consiste no processo de descarga (bateria-rede) para 100% da potência nominal.

A análise apresentada pelo fabricante vem de encontro com a metodologia da norma IEC61400-21.

A norma utilizada pelo fabricante para a realização destes testes e validação faz parte de um conjunto de quatro normas (IEC61400-21-1, IEC61400-21-2, IEC61400-21-3 e IEC61400-21-4), sendo que a parte 3 refere-se ao modelo harmónico a aplicações.

A Figura 25 representa o histograma de distorção harmónica de corrente para as diversas situações de carga (de 0 à 100% da potência nominal) para as harmónicas da ordem 2 até 50.

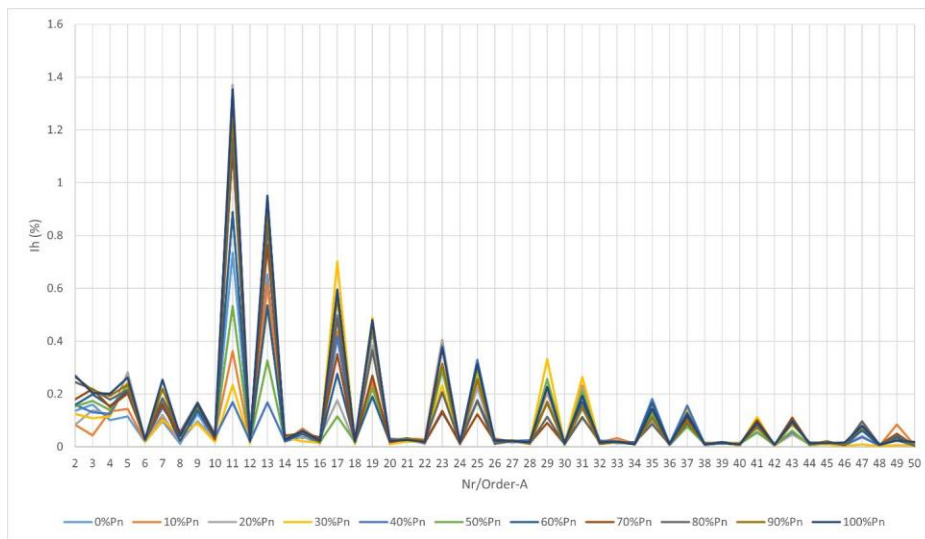


Figura 25: Distorção harmónica de corrente numa das fases durante o processo de descarga da bateria [20]

Os mesmos valores estão disponibilizados pelo fabricante em um formato de tabela, sendo possível assim reconstruir a forma de onda correspondente com o conteúdo harmónico apresentado.

Como é possível analisar na Figura 25, as harmónicas de magnitude mais significativa são a 11ª, 13ª, 17ª e 19ª. É possível identificar que as componentes pares são muito próximas de zero, o que sugere que a forma de onda de corrente apresenta boa simetria entre os semi-ciclos.

Cada uma das curvas indica uma percentagem da carga nominal do conversor, o que sugere que o pior cenário harmónico ocorre na condição de plena carga (100%Pn).

Com a utilização de recursos do software PLECS, foi possível construir uma forma de onda a partir da soma de diversas sinusoides com a amplitude e frequência de cada harmónico correspondente.

O modelo foi criado apenas com as 20 primeiras harmónicas, principalmente por questões de tempo de processamento e por interpretar que o maior conteúdo harmónico do sinal estaria no espectro dos 20 primeiros múltiplos.

A Figura 26 representa o recurso utilizado para a criação da forma de onda distorcida.

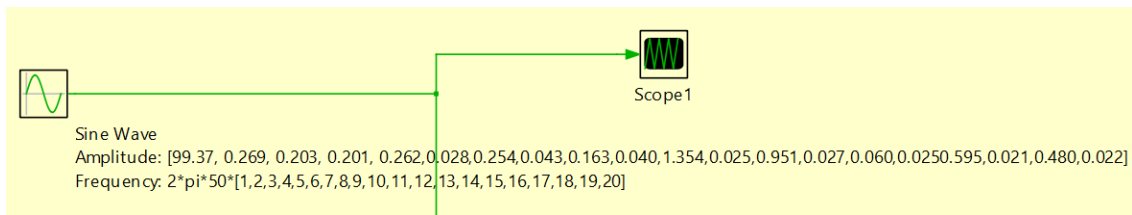


Figura 26: Recurso onda sinusoidal distorcida em PLECS.

A Figura 27 representa a forma de onda resultante do modelo criado.

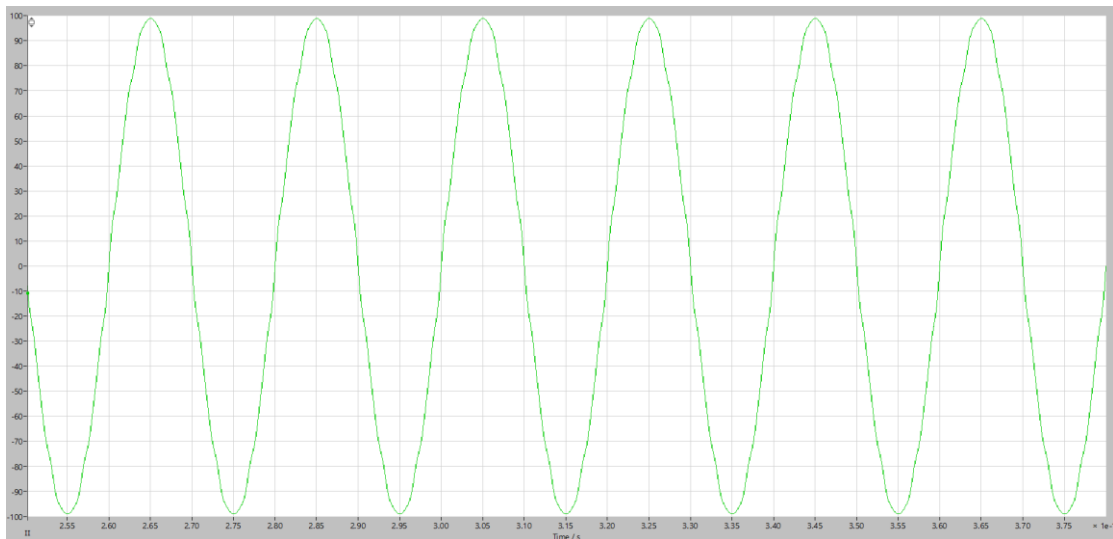


Figura 27: Forma de onda resultante.

A transformada de Fourier da forma de onda resultante devolve o mesmo histograma original do ensaio do fabricante, o que comprova que em termos de simulação será utilizado um modelo fiel à forma de onda real. A Figura 28 representa a transformada de Fourier do sinal resultante obtida no ambiente de simulação PLECS.

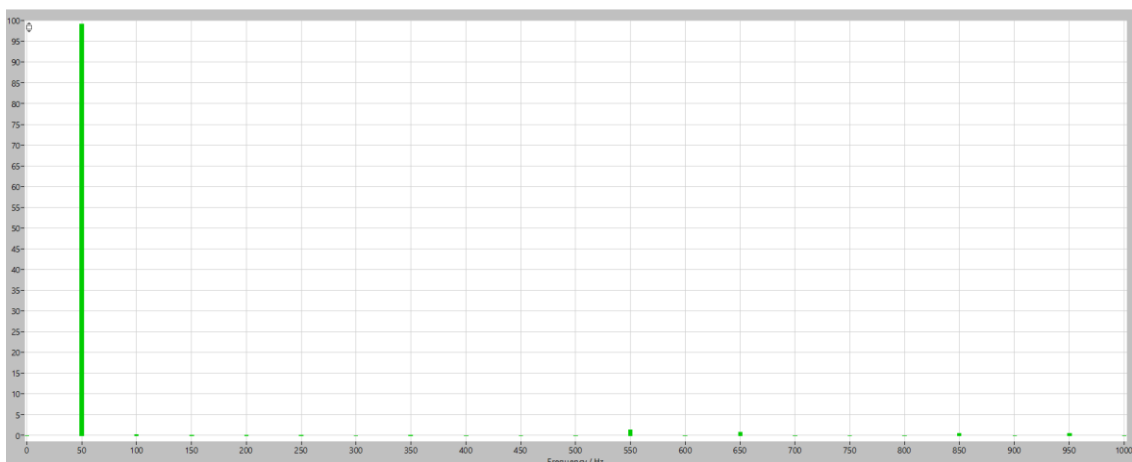


Figura 28: Análise de Fourier do sinal resultante

Para complementar o modelo da forma de onda, uma vez que se pretende analisar também o comportamento do núcleo do transformador frente ao transitório de curto-circuito, foi utilizado um somador, com uma função exponencial decrescente com o objetivo de reconstruir a componente contínua e amortecida presente nestes fenômenos.

Para obter a expressão que representa a exponencial decrescente do curto-circuito, foram consultados os antecedentes da rede elétrica onde se vai implementar o projeto, bem como, os estudos de coordenação e ajustes de proteções do projeto, que informam que a rede no ponto de interconexão de média tensão possui uma relação $X/R = 14$.

Para uma frequência de 50 Hz, temos um período de duração de 0,2 s, ou 20 ms, o que representa que 4 constantes de tempo (ou períodos) tem a duração de 80ms.

A velocidade angular é dada pela expressão 4:

$$\omega = 2 \times \pi \times f \quad (4)$$

Logo, a velocidade angular para um sistema de 50 Hz é de 314 rad/s

A impedância de uma rede de distribuição, é dada pela componente real (R) mais a componente imaginária (X) conforme a equação 5.

$$Z = R + jX \quad (5)$$

Como a relação X/R é igual a 14, sabemos que a reatância X pode ser considerada como 14R, conforme desenvolvimento da equação 6.

$$\frac{X}{R} = 14 \Rightarrow X = 14R \quad (6)$$

A indutância do sistema pode ser encontrada em função da reatância, e desenvolvida em acordo a expressão 7:

$$X = \omega L \Rightarrow L = \frac{X}{\omega} = \frac{14R}{314} \quad (7)$$

De acordo com a revisão bibliográfica, o fator de amortecimento α do sistema é dado e desenvolvido pela equação 8:

$$\alpha = \frac{R}{2L} = \frac{R}{2 \times \frac{14R}{314}} = \frac{314R}{28R} \cong 11,22 \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

A expressão da corrente de curto-circuito assimétrica é dada pela equação 9 que segue:

$$i(t) = I_0 \times e^{-\alpha t} \times \cos(\omega t) \quad (8)$$

Substituindo os valores, concluí-se que a componente assimétrica dura os primeiros 80ms do curto-circuito segue a seguinte expressão:

$$i(t) = I_0 \times e^{-11,22t} \times \cos(314t) \quad (9)$$

A Figura 29 representa o modelo contemplando a soma da forma de onda distorcida da Figura 27 com a componente assimétrica exponencial decrescente.

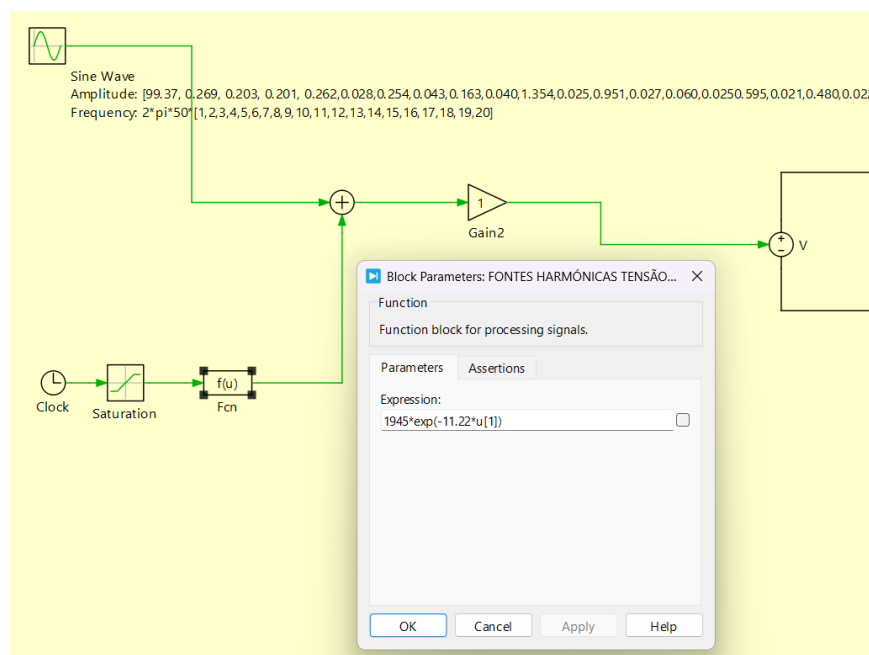


Figura 29: Modelo corrente de assimétrica somado com senoide distorcida.

Como resultado da soma das duas formas de onda encontra-se o apresentado na Figura 30

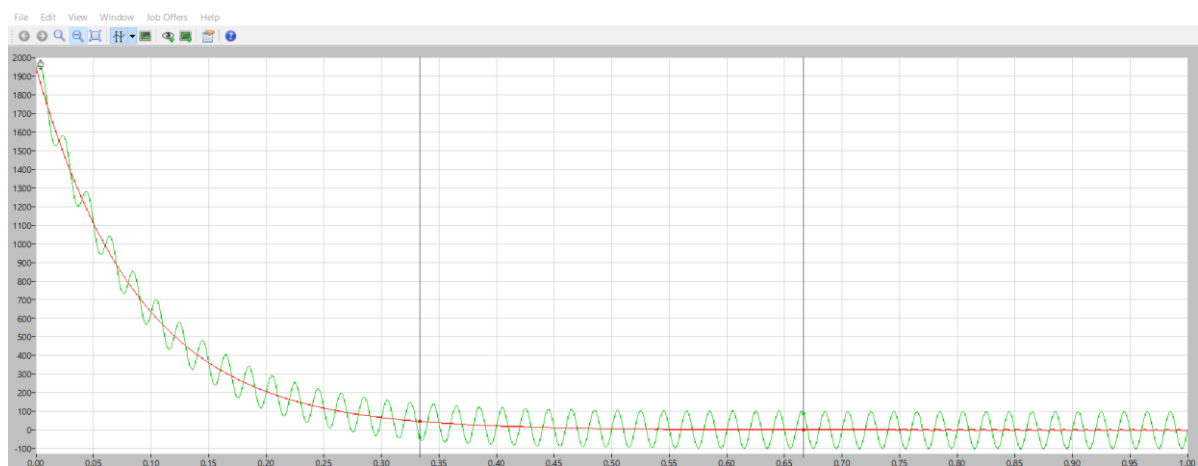


Figura 30: Forma de onda resultante.

Com a utilização dos recursos do software PLECS foi possível reconstruir a forma de onda real com conteúdo harmônico disponibilizada pelo fabricante, bem como, simular a componente assimétrica existente durante um evento de curto-circuito típico.

Portanto, foi possível desenvolver o modelo de um transformador real e saturável, bem como da fonte de alimentação com o conteúdo harmônico previsto e medido pelo fabricante da solução BESS, além da soma de uma componente assimétrica real, baseado nos valores dos

estudos sistémicos prévios das magnitudes de curto-circuito, tendo assim um modelo aproximado aos níveis de curto-circuito que podem ser expostos os transformadores de corrente em uma situação de falha de isolamento ou manobras indevidas.

Com este modelo, será possível realizar a comparação entre uma forma de onda sinusoidal pura (sem conteúdo harmónico) e com o conteúdo harmónico expectável, com o objetivo de comparar sua influência nos fenómenos de saturação do transformador modelado.

4.3 Análises da saturação

Para compreender o fenómeno de saturação, foi inserido um amperímetro em cada enrolamento do transformador, com o objetivo de analisar as correntes no enrolamento primário e secundário, e com base em sua forma de onda, identificar se o transformador se encontra na zona linear ou de saturação.

Os valores de amplitude de corrente foram ajustados de forma empírica, com o objetivo de garantir que durante a componente assimétrica o transformador estaria em estado de saturação, retomando a operar na zona linear durante a componente simétrica. Este ajuste teve como objetivo criar a mesma situação, para uma rede sinusoidal pura e para uma rede com conteúdo harmónico, uma vez que o principal objetivo do trabalho é avaliar o impacto da saturação em redes com conteúdo harmónico.

A Figura 31 representa o transformador saturável com os amperímetros instalados no lado primário e secundário, que tem como objetivo monitorizar a corrente em cada um dos enrolamentos. A resistência de 1Ω inserida no secundário, é apenas para simular o efeito do relé de proteção, uma vez que o circuito com a entrada de corrente é um caminho de baixa impedância.

Este valor tem 1Ω tem relação com o típico consumo dos circuitos de corrente destes relés de proteção. Muitos fabricantes, declaram que os amperímetros internos dos relés de proteção representam uma carga ao transformador de corrente de 1 VA , quando com uma corrente de 1 A . Pela lei de ohm, se pode concluir que a impedância vista pelo transformador de corrente nestes equipamentos é de 1Ω .

Este valor pode variar dependendo da relação de transformação programada no relé, bem como, da marca e modelo do equipamento. Aqui atribui-se este valor apenas com a finalidade de não ter o secundário em aberto.

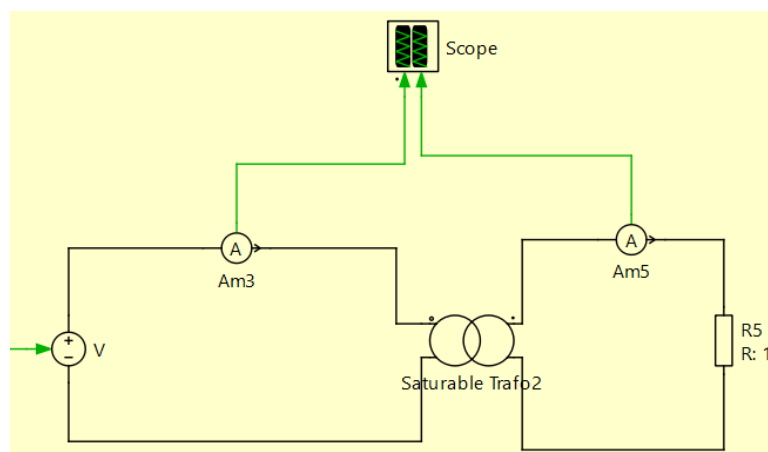


Figura 31: Estrutura do transformador com instrumentação ligada.

4.3.1 Análise sem conteúdo harmónico

Com o objetivo de comparar os impactos do conteúdo harmónico existente em sistemas BESS, o mesmo modelo foi submetido primeiramente a uma forma de onda puramente sinusoidal de 50 Hz, ou seja, sem a presença do conteúdo harmónico.

A Figura 32 representa o modelo desenvolvido, e a Figura 33 representa as formas de onda de corrente primária e secundária.

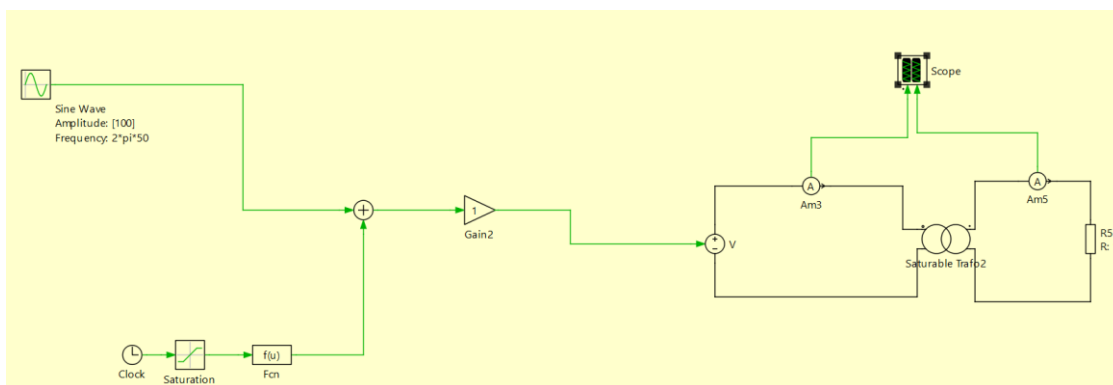


Figura 32: Modelo completo. Forma de onda sem conteúdo harmónico.

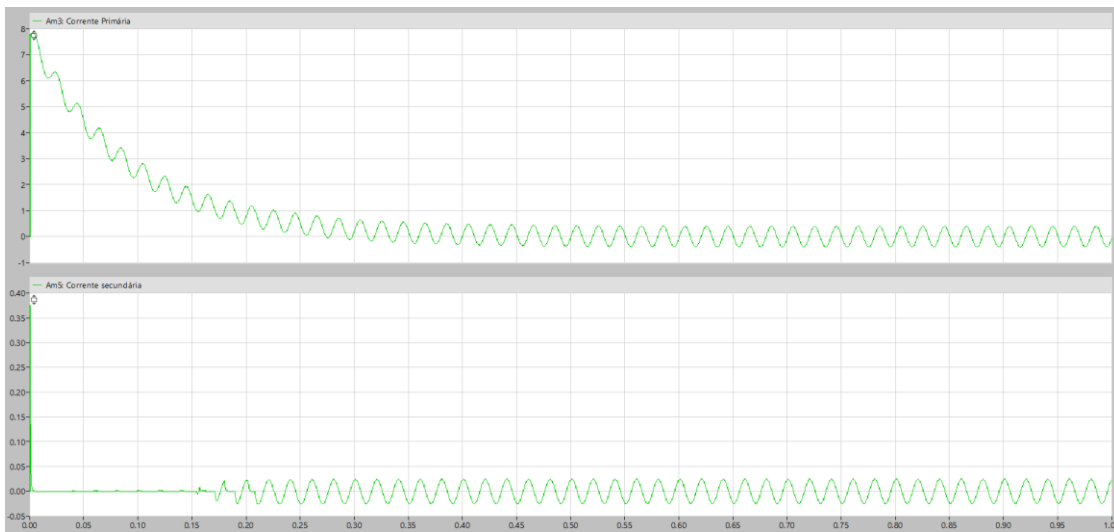


Figura 33: Formas de onda de corrente sem conteúdo harmónico.

Analisando a Figura 33 é possível identificar que efetivamente o transformador está com o núcleo na zona de saturação em função da forma de onda da corrente secundária. Esta conclusão se dá devido que durante o decurso da componente assimétrica (exponencial decrescente) a corrente de saída é praticamente zero, e pouco antes dos 20 ms, começa a surgir corrente no lado secundário, o que sugere que a saturação ocorre não só pela amplitude, mas também pela componente contínua da corrente de curto-circuito, em linha com a fundamentação teórica desenvolvida no estado da arte.

A corrente de saída é nula nos primeiros 20ms devido à componente assimétrica, pois não havendo a variação do fluxo, não existe força eletromotriz induzida no secundário, o que leva a conclusão do bom desempenho do modelo face aos conceitos teóricos.

Ao realizar uma análise ao detalhe, é possível identificar que os primeiros resíduos da corrente no lado secundário começam a surgir em 0,155 segundos após o início, e que efetivamente a corrente secundária passa a ter uma forma de onda sinusoidal após 0,235 segundos. A Figura 34 representa a forma de onda da corrente de saída em detalhe, o que sugere que a componente CC existente no fenómeno de curto-circuito tem grande impacto no fenómeno de saturação do núcleo.

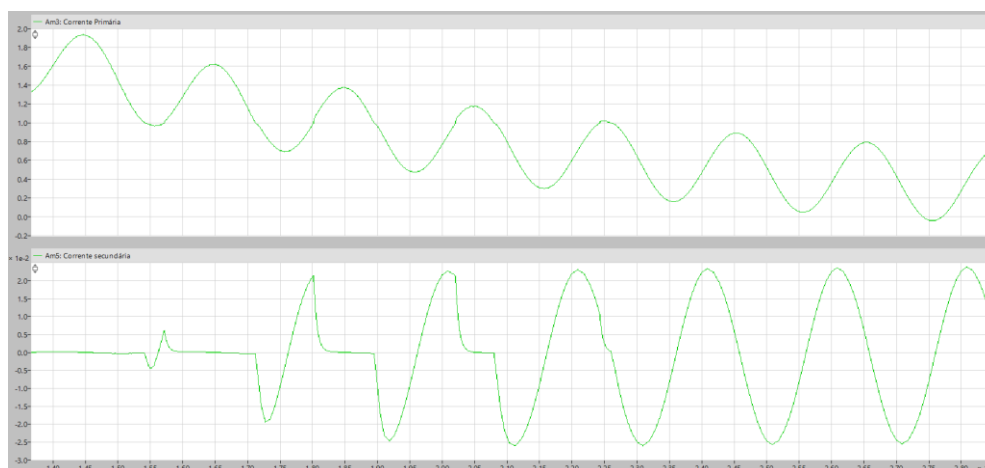


Figura 34: Detalhe do fim da saturação do núcleo.

Dentre os resultados aqui encontrados, a problemática da saturação do núcleo dos transformadores de corrente fica evidente, uma vez que se a relação X/R da rede representar um amortecimento significativo, os relés de proteção associados a estes instrumentos podem ter uma atuação atrasada, uma vez que, só será possível identificar uma sobrecorrente do lado primário neste caso em estudo após aproximadamente 200ms, ou seja, 10 ciclos de rede completos, o que representa uma energia incidente muito alta sobre as celas e cabos de média tensão que podem gerar danos irreversíveis nestes equipamentos, devido à não atuação instantânea das proteções.

A presença da componente DC neste modelo apresentou maior relevância, o que sugere que se existirem harmônicas de ordem par nos sistemas, os fenômenos de saturação podem ser ainda mais agravados, e estes resultados serão apresentados no capítulo seguinte, com a mesma análise sendo realizada na rede modelada com o conteúdo harmônico existente.

4.3.2 Análise com conteúdo harmônico

Com o objetivo de comparar os fenômenos de saturação do núcleo dos transformadores de corrente, neste capítulo serão apresentadas as análises das correntes primárias e secundárias para o mesmo transformador, mas face à rede com conteúdo harmônico.

Conforme referido no capítulo 0, o conteúdo harmônico presente nos sistemas BESS, proveniente da eletrônica de potência presente no inversor, foi validado pelo fabricante, mediante a medição com recurso de um analisador de qualidade de energia, e seguindo os preceitos normativos da IEC 61400-21. O objetivo é compreender o impacto da presença deste conteúdo harmônico no fenômeno de saturação com a mesma metodologia utilizada para a análise aos 50 Hz.

A Figura 35 representa o modelo desenvolvido, e a Figura 36 representa as formas de onda de corrente primária e secundária com todas as componentes harmônicas envolvidas.

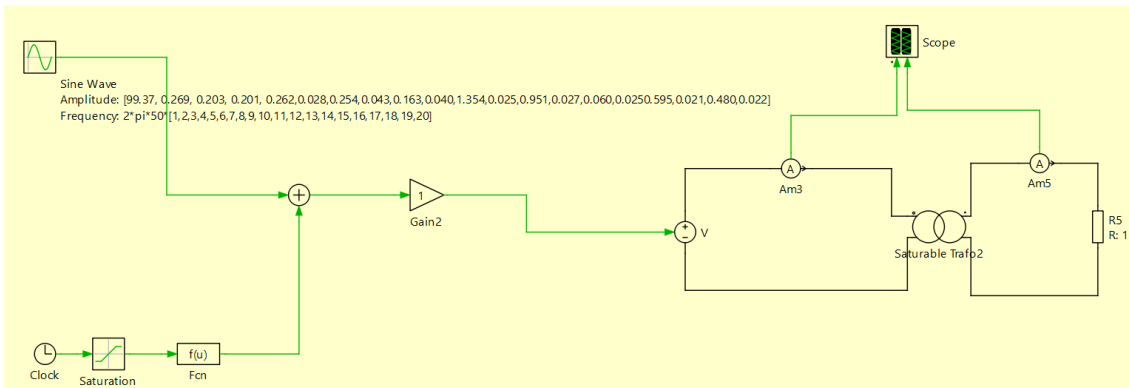


Figura 35: Modelo completo Forma de onda com conteúdo harmónico.

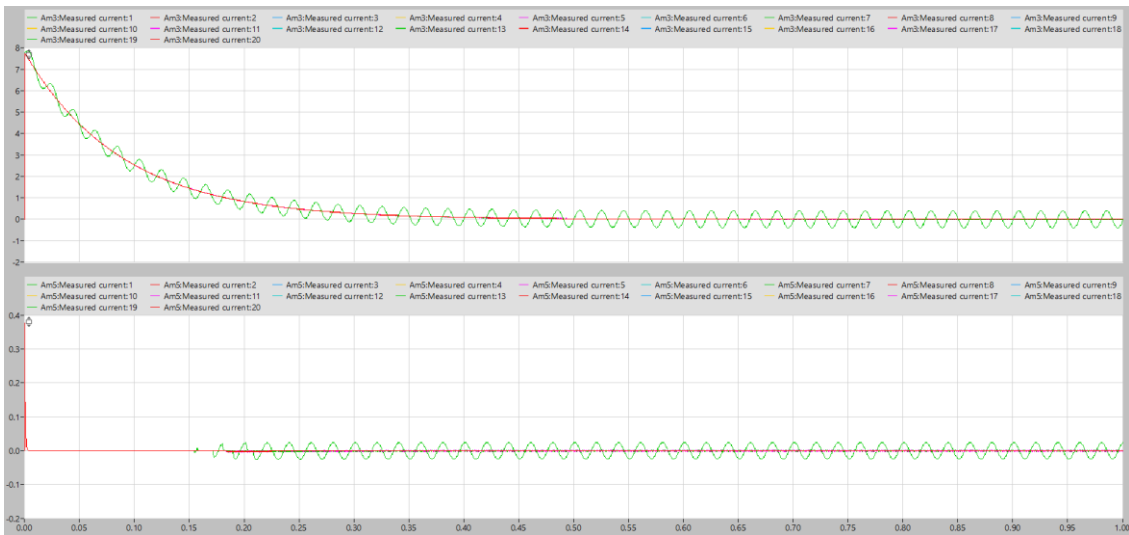


Figura 36: Formas de onda de corrente com conteúdo harmónico.

Analisando a Figura 36 é possível identificar que efetivamente o transformador também está com o núcleo na zona de saturação em função da forma de onda da corrente secundária.

Ao realizar uma análise ao detalhe, é possível identificar que os primeiros resíduos da corrente no lado secundário começam a surgir em 0,155 segundos após o início, e que efetivamente a corrente secundária passa a ter uma forma de onda sinusoidal após 0,235 segundos. A Figura 37 representa a forma de onda da corrente de saída em detalhe, desta vez com todo o conteúdo harmónico existente.

Os tempos de duração do fenómeno de saturação foram praticamente os mesmos, o que sugere que o conteúdo harmónico neste caso tem pouco impacto na saturação do núcleo, devido à pequena amplitude das componentes pares da decomposição de Fourier, que estão associadas à componente DC do sinal.

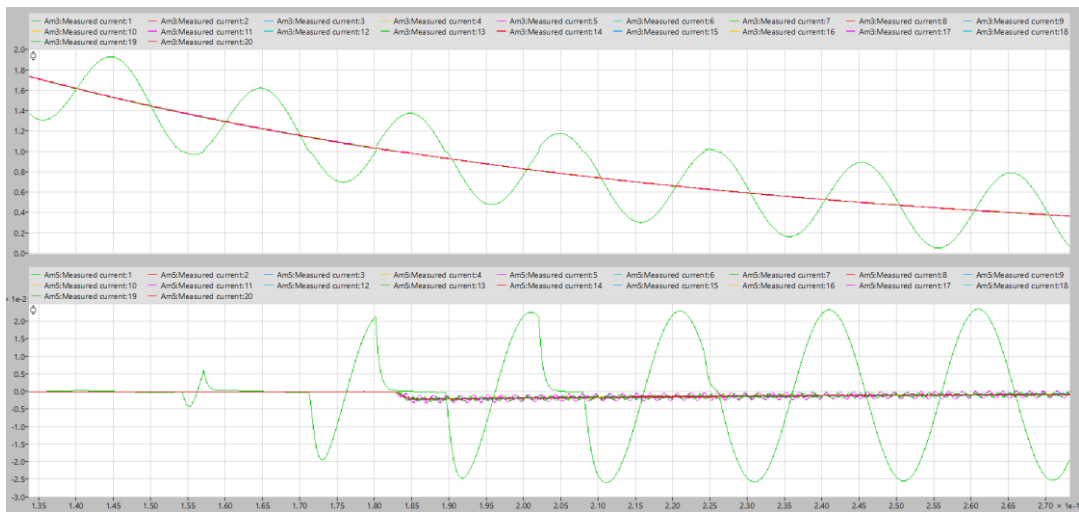


Figura 37 Detalhe do fim da saturação do núcleo.

4.3.3 Análise comparativa – conteúdo harmónico x rede sinusoidal pura

Para melhor comparação entre os fenómenos de saturação da rede com conteúdo harmónico versus a rede puramente sinusoidal, o modelo foi duplicado no mesmo ambiente de simulação, de forma que fosse possível compara as formas de onda secundárias entre ambos cenários, e realizar operações de subtração entre si, para perceber se efetivamente existe alguma diferença e influência dos harmónicos sobre o fenómeno de saturação.

A Figura 38 representa o modelo integrado, com as redes com conteúdo harmónico e puramente sinusoidal, e a Figura 39 representa as 4 formas de onda de cada um dos sistemas.

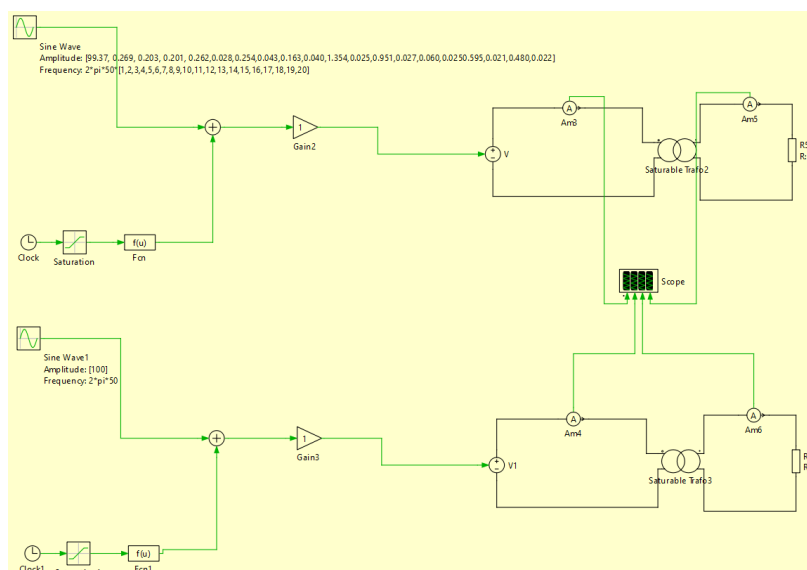


Figura 38: Modelo integrado para comparação.



Figura 39: Formas de onda das duas redes em simultâneo.

Ao analisar as 4 formas de onda em separado, não é possível chegar a nenhuma conclusão ao detalhe do efeito do conteúdo harmónico face ao fenómeno de saturação. Para melhor análise e conclusão, foi inserido um operador matemático de subtração entre os dois sinais secundários, com o objetivo de analisar ao detalhe a diferença entre ambos e analisar a influência do conteúdo harmónico face ao fenómeno de saturação.

A Figura 40 representa a corrente secundária com harmónico, sem harmónicos e a subtração de ambos os sinais, respetivamente.

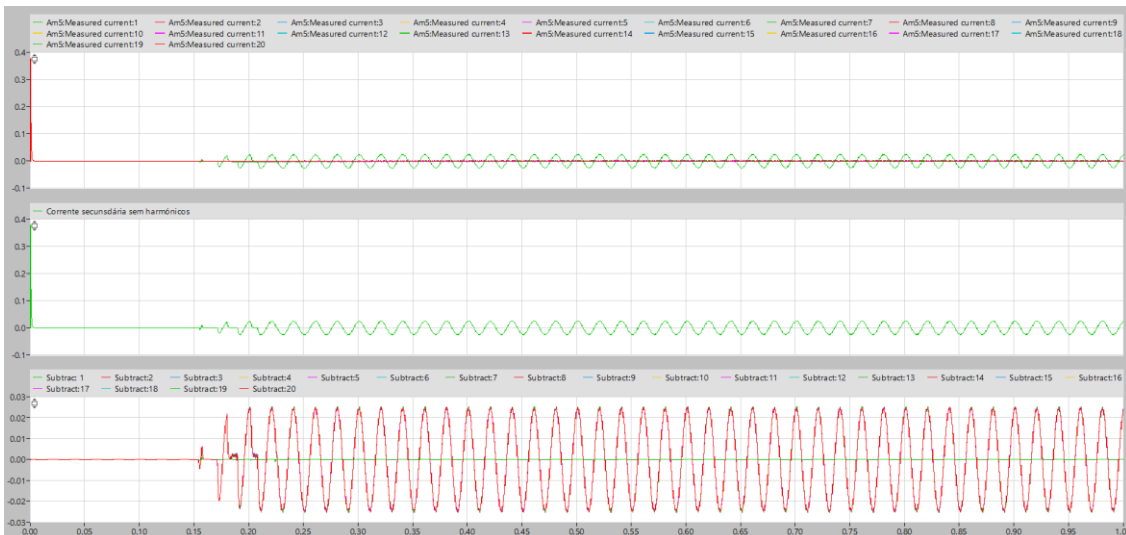


Figura 40: Formas de onda secundária dos dois cenários e a subtração.

Após o regime transitório é possível identificar que existe presente apenas as componentes das frequências superiores à fundamental. Realizando um zoom nos primeiros 235ms, e avaliando a diferença entre os sinais é possível identificar a presença de um sinal resultante, dado pelo resultado da subtração de ambas as correntes, o que sugere que a corrente

secundária com a presença de conteúdo harmónico é ligeiramente diferente da puramente sinusoidal, especificamente pela presença das harmónicas pares, que resultam em um sinal assimétrico e cuja média é diferente de zero (*offset* em relação à referência).

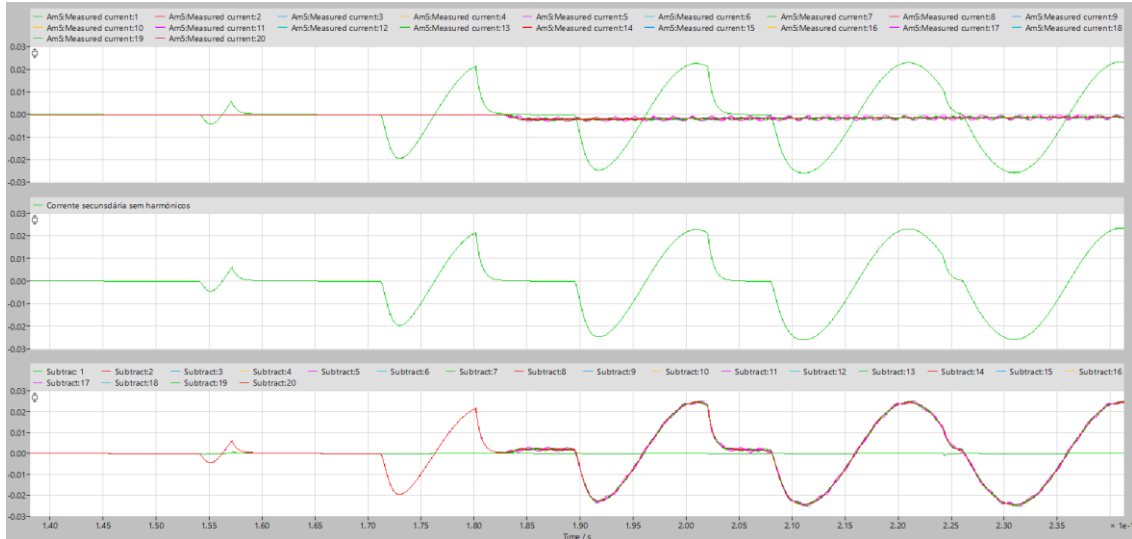


Figura 41: Comparativo entre correntes secundárias - regime transitório.

A primeira diferença identificada tem relação com o fenómeno de início da presença da corrente de saída, aproximadamente aos 135ms. Efetivamente, o operador de subtração indica uma diferença entre as formas de onda resultantes, o que sugere algum impacto na corrente secundária durante o período transitório proveniente do conteúdo harmónico. A Figura 42 representa o zoom entre os 149,5ms e 164,5ms. Onde é possível identificar a presença de uma corrente resultante na componente fundamental de 50 Hz entre os 157ms e 158ms.

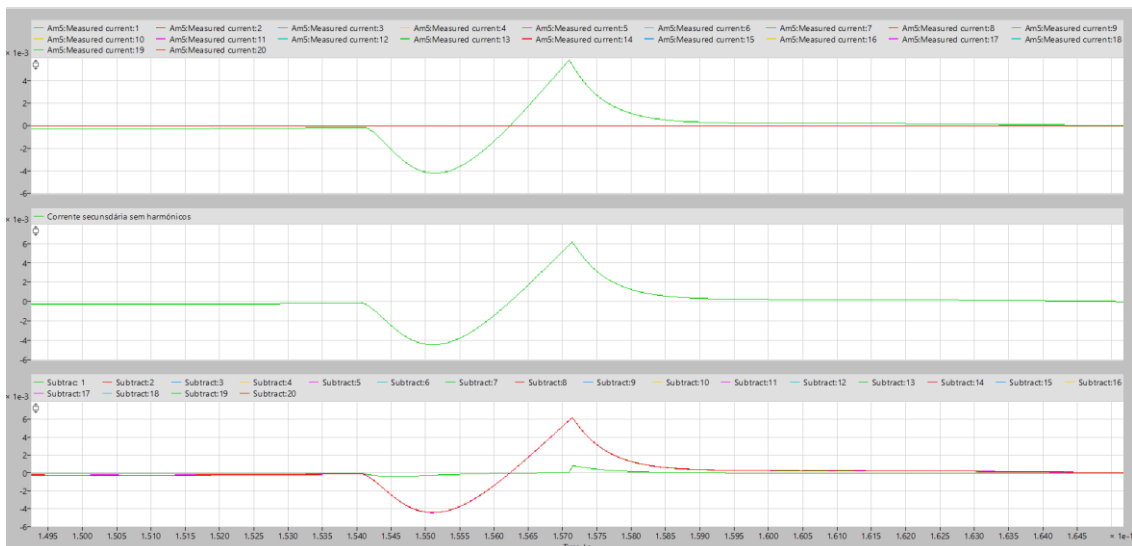


Figura 42: Análise transitória - primeira diferença identificada.

Ao analisar com zoom o período compreendido entre 164 ms e 228 ms, é possível identificar que a presença do conteúdo harmônico do lado primário só se reflete para o lado secundário aproximadamente aos 182 ms, o que indica que durante a componente assimétrica do curto-circuito, o conteúdo harmônico do lado primário não se reflete para o lado secundário, o que sugere que durante este período, não há influência do conteúdo harmônico sobre a saturação nem a sua presença na corrente de saída e nos equipamentos de medida / proteção.

A Figura 43 representa o detalhe deste período de análise.

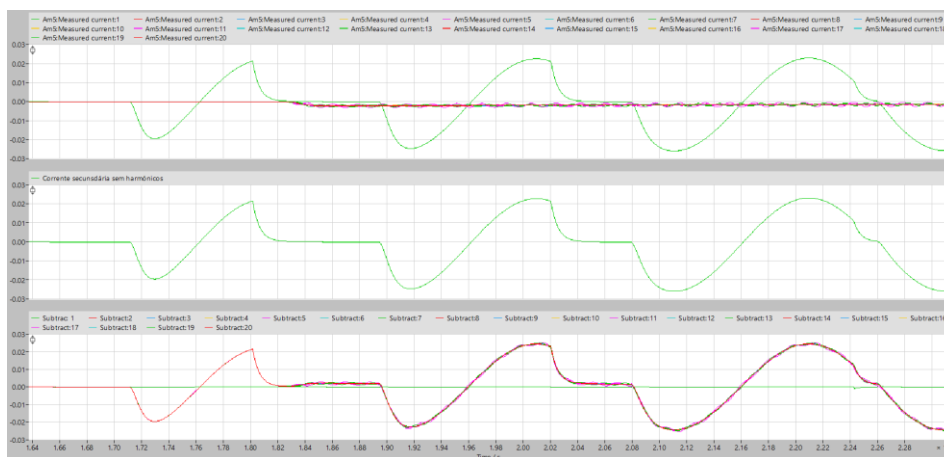


Figura 43: Análise transitória - segunda diferença identificada.

Realizando um zoom entre os 170 ms e os 270 ms, é possível identificar que existe uma pequena diferença entre os dois sinais aproximadamente aos 223 ms, e que após o regime permanente, a subtração das duas correntes secundárias é aproximadamente zero, ou seja, mesmo com a presença do conteúdo harmônico do lado primário, não é possível identificar influência deste conteúdo sobre a performance do transformador de corrente em regime permanente, ou seja, na condição de normal operação.

A Figura 44 representa a análise entre os 170 ms e 270 ms.

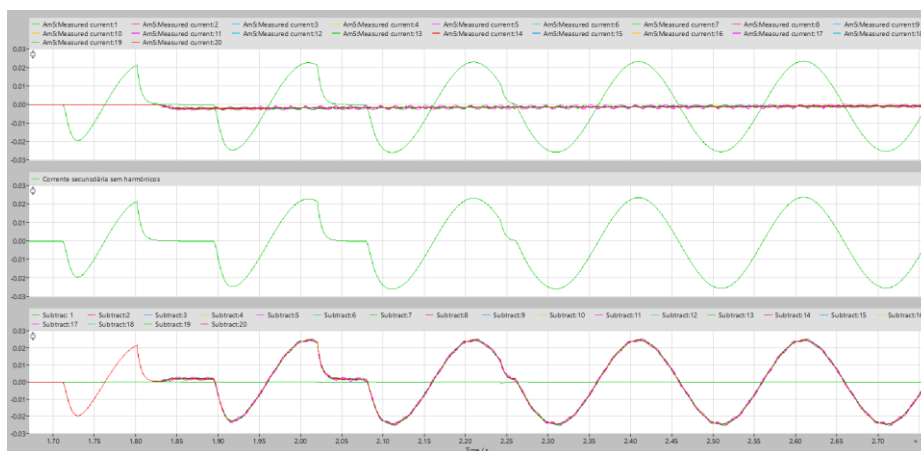


Figura 44: Análise transitória e permanente.

5 Conclusão

Após a realização da revisão bibliográfica, e do estado da arte no que se refere aos transformadores de instrumentação, proteção de sistemas de média e alta tensão, bem como, dos sistemas de armazenamento de energia, foi possível identificar que a qualidade de energia entregue por estes sistemas é um ponto relevante, pois uma não atuação das proteções por conta da saturação dos transformadores pode resultar em graves consequências para os sistemas elétricos de energia, como desligamento de grandes centrais e efeitos cascata como o desligamento por completo de subestações e linhas, além de todos os prejuízos económicos e sociais da falha do fornecimento de energia na sociedade.

A saturação dos transformadores de corrente é uma análise fundamental no projeto e dimensionamento dos sistemas de proteção de média e alta tensão quando do uso de transformadores convencionais, uma vez que é de extrema importância garantir que os transformadores de corrente estejam operando dentro da zona linear durante um fenómeno de curto-circuito, com o objetivo de conseguir, mesmo nestas situações, reportar aos relés de proteção tais elevações de corrente, de forma que os disparos das proteções ocorram de acordo com a filosofia de proteção implementada, bem como, com os estudos de coordenação e ajustes de proteção desenvolvidos nestas redes.

O transformador em análise foi calculado para não saturar durante um fenómeno de curto-circuito, considerando a magnitude da corrente de curto-circuito envolvida e também o amortecimento e componente assimétrica (relação X/R da rede onde foi concebido para operar), e de facto, modelando os parâmetros reais do transformador foi possível identificar que o mesmo não saturava durante o regime transitório, o que comprova a validade das equações 1 e 2 tipicamente utilizadas para análise de saturação de transformadores de corrente.

Como o objetivo do estudo era analisar um transformador de corrente em saturação e analisar o impacto do conteúdo harmónico existente em sistemas BESS, foram atribuídos parâmetros ao circuito equivalente do transformador modelado de forma empírica, com o objetivo de garantir que o mesmo estaria saturado durante o regime transitório (componente assimétrica) e que voltaria a operar normalmente em regime transitório.

Tal implementação teve como objetivo principal analisar a influência do conteúdo harmónico durante e depois do fenómeno de curto-circuito com um transformador que teria o núcleo saturado mesmo em uma rede sinusoidal pura, ou seja, sem a presença de nenhum conteúdo harmónico.

Dentre as principais conclusões que se pode ter sobre o modelo implementado, pode-se referir que o conteúdo harmónico existente no sistema BESS estudado, baseado no histograma harmónico fornecido pelo fabricante da solução, pouca influência tem sobre o fenómeno de saturação dos transformadores de corrente.

De qualquer maneira, cabe ressaltar que a qualidade de energia é um parâmetro de extrema importância nos sistemas elétricos de energia, principalmente pela presença de cargas não lineares e produção de energias renováveis.

As normativas aplicadas a estes sistemas no âmbito da certificação de produtos devem ser restritivas ao conteúdo harmónico excessivo, uma vez que ainda não é possível identificar o impacto global destas distorções sobre os sistemas de proteção de média e alta tensão.

Cabe ressaltar que as conclusões sobre este trabalho se referem apenas as simulações e modelos numéricos utilizados, e como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes em bancada para avaliar estes mesmos fenómenos, para avaliar outros temas como ressonâncias no entreferro, resposta em frequência e efeitos térmicos do conteúdo harmónico que não foram possíveis de explorar nas simulações desenvolvidas.

O padrão de conteúdo harmónico fornecido pelo fabricante da solução BESS não apresentou significativa influência sobre o fenómeno de saturação do transformador de corrente para as simulações realizadas, mas cabe ressaltar que apenas os ensaios de medição de qualidade de energia realizados após a implementação do sistema devem apontar para o real conteúdo harmónico da solução BESS implementada.

A revisão da bibliografia aponta para possíveis tecnologias emergentes no âmbito desta aplicação. Dentre elas, destaca-se o transformador de corrente do tipo ótico, que além de apresentar um comportamento linear em toda a gama de operação, sugere melhor performance face aos fenómenos eletromagnéticos, e já encontra com alguma implementação nas subestações de alta tensão digitalizadas em conformidade à norma IEC 61850.

Cabe ressaltar que a análise da adoção de qual tecnologia de transformador de corrente a utilizar depende diretamente dos custos de implementação. Até o presente momento, nos projetos da CJR Renewables todos os transformadores de corrente e potencial são de tecnologia convencional (ferromagnético) nas celas de média tensão.

Referências

- [1] Rahul Bollini, 'Understanding battery energy storage system-bess-part 3-project-planning'. Accessed: Dec. 24, 2024. [Online]. Available: <https://evreporter.com/understanding-battery-energy-storage-system-bess-part-3-project-planning/>
- [2] 'Schneider Electric Website', <https://www.se.com/pt/pt/product/REL50454/powerlogic-p5f30-48250v-3tc-1csh-4tp-16di12do-rstp-eth-rj45/>. Accessed: Jan. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.se.com/pt/pt/product/REL50454/powerlogic-p5f30-48250v-3tc-1csh-4tp-16di12do-rstp-eth-rj45/>
- [3] G. G. Farivar *et al.*, 'Grid-Connected Energy Storage Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies', *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 4, pp. 397–420, Apr. 2023, doi: 10.1109/JPROC.2022.3183289.
- [4] 'European Association for Storage of Energy', <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>. Accessed: Dec. 25, 2024. [Online]. Available: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>
- [5] R. Tapia-Sánchez, A. Medina-Rios, N. M. Salgado-Herrera, D. Granados-Lieberman, J. R. Rodríguez-Rodríguez, and J. L. Guillén-Aguirre, 'Reactive Power Compensation in Distribution Systems Through the DSTATCOM Integration Based on the Bond Graph Domain', *Arab J Sci Eng*, vol. 45, no. 3, pp. 1435–1446, Mar. 2020, doi: 10.1007/s13369-019-03988-3.
- [6] U. Hashmi, L. Pereira, and A. B. Bušić, 'Energy storage in Madeira, Portugal: co-optimizing for arbitrage, self-sufficiency, peak shaving and energy backup'.
- [7] *2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas & 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy (AICERA 2013: ICMiCR)*. IEEE, 2013.
- [8] M. Nazemi, M. Moeini-Aghaie, M. Fotuhi-Firuzabad, and P. Dehghanian, 'Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes', *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 795–806, Apr. 2020, doi: 10.1109/TSTE.2019.2907613.
- [9] J. Pou, R. Pindado, D. Boroyevich, and P. Rodríguez, 'Evaluation of the low-frequency neutral-point voltage oscillations in the three-level inverter', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 6, pp. 1582–1588, Dec. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.858723.

- [10] G. Wang *et al.*, 'A review of power electronics for grid connection of utility-scale battery energy storage systems', Oct. 01, 2016, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/TSTE.2016.2586941.
- [11] S. P. Engel, M. Stieneker, N. Soltau, S. Rabiee, H. Stagge, and R. W. De Doncker, 'Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids', *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 1, pp. 124–137, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2310656.
- [12] A. Hargrave, M. J. Thompson, and B. Heilman, 'Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT Saturation'.
- [13] W. Liu, Z. Xu, Z. Wang, Y. Wang, Y. Li, and M. Wen, 'Missing Information Protection Considering Inrush Current and CT Saturation', in *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology, ICEEMT 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 115–120. doi: 10.1109/ICEEMT56362.2022.9862652.
- [14] Youhuai Wang, H. Z. Zengli Yang, Wenbin Cao, Xianggen Yin, and Qian Guo, *Study on Transformer Inrush Current and CT Saturation as well as the Impact of Their Coupling Effect on Protection*. IEEE, 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8081031>.
- [15] J. Mamede Filho, 'Proteção de Sistemas Elétricos de Potência', 2013.
- [16] N. Ivanov, R. Kanafeev, and V. Terzija, 'Impact of Electromagnetic and Optical CTs on Transformer Differential Protection during Transformer Re-energization', in *2023 IEEE Belgrade PowerTech, PowerTech 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/PowerTech55446.2023.10202781.
- [17] M. H. Samimi, A. Mahari, M. A. Farahnakian, and H. Mohseni, 'The rogowski coil principles and applications: A review', Feb. 01, 2015, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/JSEN.2014.2362940.
- [18] M. Crescentini, S. F. Syeda, and G. P. Gibiino, 'Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques', *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 11, pp. 10137–10151, Jun. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3119766.
- [19] Alce Elektrik Sanayi, 'FAT TCs 1250-5 ALCE', Pendik, Istanbul, Apr. 2024.
- [20] Zhenghao Yuan and Yuquiang Jin, 'Harmonic current Test Report Type Reference: SC210HX', Hefei, P.R. China, Mar. 2024. [Online]. Available: www.sungrowpower.com

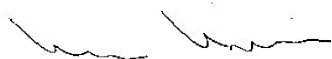
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.



ISEP, Porto, 29 de junho de 2025