



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

BRUNO DE MELLO LAURINDO

**Estudo de Metodologia para Configuração
Ótima de Conversores Eletrônicos de
Potência a partir da Análise da
Confiabilidade e Custo do Sistema**

NITERÓI

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

BRUNO DE MELLO LAURINDO

Estudo de Metodologia para Configuração Ótima de Conversores Eletrônicos de Potência a partir da Análise da Confiabilidade e Custo do Sistema

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador:

Bruno Wanderley França

NITERÓI

2022

(Espaço reservado para a ficha catalográfica)

BRUNO DE MELLO LAURINDO

ESTUDO DE METODOLOGIA PARA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE
CONVERSORES ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA A PARTIR DA ANÁLISE DA
CONFIABILIDADE E CUSTO DO SISTEMA

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da Universidade
Federal Fluminense como requisito parcial para a
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia
Elétrica.

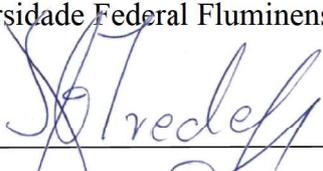
Aprovado em 13 de janeiro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Wanderley França - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Bruno Soares Moreira Cesar Borba
Universidade Federal Fluminense - UFF



Maurício Aredes
Professor Titular
SIAPE 1240889
DEE/Poli/UFRJ



Prof. Dr. Maurício Aredes
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Niterói
2022

Porque és precioso aos meus olhos, porque eu te aprecio e te amo, permuto reinos por ti, entrego nações em troca de ti. Fica tranquilo, porque estou contigo [...]

Livro de Isaias, 43; 4-5

*Aos meus pais, Aluizio Laurindo (in memoriam) e Marly Mello,
e a minha esposa Larisse Laurindo.*

Agradecimentos

Apresento os meus agradecimentos a Deus antes de tudo, por ter colocado em meu caminho pessoas boas e certas, no momento certo durante esta caminhada.

Em seguida, agradeço com todo amor e carinho a minha mãezinha querida Marly Mello, que sempre me apoiou e incentivou em toda e qualquer dificuldade que aparecesse. *Em memoriam*, agradeço ao meu velho pai Aluizio Laurindo, meu bom amigo, maior exemplo de homem mentalmente forte, sério, honesto e grande incentivador do conhecimento através do estudo, que não pode acompanhar de corpo este passo, mas acredito que acompanhou de alma. Obrigado!

Não menos importante, agradeço a minha, hoje esposa Larisse Batista Laurindo, que durante boa parte dessa trilha foi minha namorada, segurando minha onda, com carinho e apoio, sempre acreditando em mim, na minha capacidade. Ainda farei muitos jantares gostosos para você, Flor, pós defesa! Obrigado!

Agradeço fortemente ao professor Mauricio Aredes, que me abriu as portas de seu laboratório para que eu pudesse retomar os estudos e ir em frente nessa conquista. Obrigado pela oportunidade e amizade.

A todos os amigos, que direta ou indiretamente colaboraram na conquista desse mestrado, seja com as disciplinas, seja com ideias para a pesquisa e na elaboração deste documento. Em especial, destaco o amigo Gustavo Czimbra B. Leal, que atende pela carinhosa alcunha de “Nelson”. Obrigado pela atenção, paciência, por parar suas atividades para entender as minhas dúvidas e ajudar a saná-las. Você não sabe o tamanho que sua ajuda alcançou na execução deste trabalho. Muito obrigado, amigo!

E por último, agradeço ao meu amigo, parceiro e orientador Bruno Wanderley França. Meu camarada, obrigado por acreditar em mim a cada passo, obrigado por sua sempre briosa sinceridade, em tudo. Seus comentários, contribuições, bate-papo, desde lá no princípio, quando ainda éramos alunos de graduação na UFRJ. Obrigado por “pressionar mais para sair mais”. Não foi fácil, e acredito que não “saiu” o quanto você desejava, mas para mim foi um excelente aprendizado. Muito obrigado a todos.

Resumo

Esse trabalho apresenta uma metodologia para determinação de configuração ótima de conversores eletrônicos de potência aplicados em sistemas de energia elétrica. Inicialmente é realizado um estudo do estado da arte acerca da investigação no que vem sendo pesquisado nos últimos 15 anos a respeito da confiabilidade e otimização de custos em sistemas com conversores de eletrônica de potência aplicados à geração fotovoltaica, bem como sua aplicação em configuração ótima em um projeto de sistemas. Também é feito um apanhado de algumas técnicas e métricas para entendimento e avaliação da confiabilidade e disponibilidade de sistemas de geração de energia com conversores conectados em paralelo. Após a apresentação da metodologia proposta, para fins de avaliação do método e sua aplicação, é utilizado um sistema de geração fotovoltaico como caso de estudo. A escolha da configuração é realizada a partir das informações da taxa de falha λ dos componentes do conversor, onde a partir desta informação inicial são calculadas outras grandezas como a taxa média entre falhas, a taxa de reparo, a disponibilidade, dentre outras, e tem como resultado a escolha da quantidade de conversores principais em paralelo e a quantidade de conversores redundantes. Além disso, a metodologia proposta apresenta indicadores quantitativos de confiabilidade e custo da topologia determinada, o que é utilizado para avaliação da viabilidade de implementação do projeto. Para o estudo de caso, foi escolhido um sistema de conversão de energia de 1000 kW aplicado em uma geração fotovoltaica. Como resultado, a aplicação do método resultou na configuração com 6 conversores principais em paralelo e 3 conversores redundantes, cada um com potência de 170 kW, apresentando um aumento de confiabilidade e uma diminuição de custo total quando comparado com outros casos estudados no decorrer do trabalho, com viabilidade econômica verificada para implementação.

Palavras-chaves: Otimização de Custo, Confiabilidade, Disponibilidade, Conversores Redundantes, Taxa de Falhas de Conversores.

Abstract

This work presents a methodology for determining the optimal configuration of electronic power converters applied in electrical energy systems. Initially, a state-of-the-art study is carried out on the investigation that has been researched in the last 15 years on reliability and cost optimization in systems with power electronics converters applied to photovoltaic generation and its application in an optimal configuration in a project of systems. Therefore, an overview of some techniques and metrics for understanding and evaluating the reliability and availability of power generation systems with converters connected in parallel is provided. To evaluate the method and its application, a photovoltaic generation system is used as a case study. The configuration choice is obtained from the information of the failure rate λ of the converter components. Other quantities are calculated from this failure rate, such as the average rate between failures, repair rate, and availability. The configuration choice determines the number of main converters in parallel and the number of redundant converters. In addition, the proposed methodology presents quantitative indicators of reliability and cost of the determined topology, which is used to assess the feasibility of implementing the project. For the case study, an energy conversion system of 1000 kW applied in a photovoltaic generation was chosen. As a result, the application of the method results in a configuration with six main converters in parallel and three redundant converters, each with a 170-kW power rate. The proposed configuration presents an increase in reliability and a decrease in total cost compared to other cases studied in the course of the work, with verified economic feasibility for implementation.

Keywords: Cost Optimization, Reliability, Availability, Redundant Converters, Converter Failure Rate.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - COTA DE ENERGIA PROVENIENTE DE FONTES RENOVÁVEIS EM 2018, COM HORIZONTE EM 2020.	2
FIGURA 2 - CIRCUITO BÁSICO DE VSC.	8
FIGURA 3 - CIRCUITO EQUIVALENTE QUE REPRESENTA O ESTÁGIO DE POTÊNCIA E O PWM MODULADOR DE UM VSC.	8
FIGURA 4 - CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO DE DOIS NÍVEIS COM ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO PWM E O PADRÃO DE TENSÕES.	10
FIGURA 5 - CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO DE TRÊS NÍVEIS COM NEUTRO GRAMPEADO E O PADRÃO DE TENSÃO DO CONVERSOR.	11
FIGURA 6 - CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO DE TRÊS NÍVEIS COM NEUTRO GRAMPEADO ATIVO.	12
FIGURA 7 - PRINCIPAIS MÉTODOS DE TOLERÂNCIA A FALHAS.	16
FIGURA 8 - UMA FASE DO CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO DE TRÊS NÍVEIS COM NEUTRO GRAMPEADO ATIVO E TOLERANTE A FALHAS.	19
FIGURA 9 - ESTRUTURA COMPLETA DO CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO DE TRÊS NÍVEIS COM NEUTRO GRAMPEADO ATIVO, TOLERANTE A FALHAS.	20
FIGURA 10 - "CURVA DA BANHEIRA".	23
FIGURA 11- DISTRIBUIÇÃO DE FALHAS EM CONVERSORES DE POTÊNCIA E AS CAUSAS-FONTE.	24
FIGURA 12 – CIRCUITO EQUIVALENTE PARA COMUTAÇÃO.	27
FIGURA 13 - TEMPO DE VIDA B_{10} PARA A JUNÇÃO DE SOLDA DA PLACA DE BASE: $T_{CYCLE} = 10s$	31

FIGURA 14 - TEMPO DE VIDA B_{10} PARA A JUNÇÃO DE SOLDA DA PLACA DE BASE: $T_{CYCLE} = 120s$.	31
FIGURA 15 - TEMPO DE VIDA B_{10} PARA A JUNÇÃO DE SOLDA DA PLACA DE BASE: $T_{CYCLE} = 24H$.	32
FIGURA 16 - ILUSTRAÇÃO DE UMA CONFIGURAÇÃO EM SÉRIE DE N SUBSISTEMAS.	38
FIGURA 17 - ESQUEMA TÍPICO DE CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS.	39
FIGURA 18 - ÁRVORE DE FALHA TÍPICA DO CONVERSOR FONTE DE TENSÃO TRIFÁSICO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS.	40
FIGURA 19 - ESQUEMA DO CONVERSOR <i>BOOST</i> BIFÁSICO.	41
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL.	41
FIGURA 21 - CONVERSOR PONTE-H MULTINÍVEL EM CASCATA APLICADA AOS <i>DRIVERS</i> MOTOR.	44
FIGURA 22 - ESQUEMA DE CONVERSOR CONVENCIONAL COM PONTO DE NEUTRO GRAMPEADO.	45
FIGURA 23 - ESQUEMA DE UM RAMO DE UM UMA FASE DO CONVERSOR COM PONTO DE NEUTRO GRAMPEADO REALIZADO COM DOIS PROJETOS TOLERANTES A FALHAS DIFERENTES.	45
FIGURA 24 - ARQUITETURA DO SISTEMA DE N CONVERSORES PARALELOS COM X DE REDUNDÂNCIA.	54
FIGURA 25 - ÍNDICES DE CONFIABILIDADE DO SISTEMA DISTRIBUÍDO EXPONENCIAL: (A) TAXA DE FALHA, (B) FUNÇÃO DE DENSIDADE DE POTÊNCIA E (C) FUNÇÃO DE CONFIABILIDADE.	57
FIGURA 26 - CONVERSOR IGBT MONOFÁSICO COM FILTRO DE SAÍDA.	59
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE FLUXO DE INFORMAÇÕES, ENTRADAS E SAÍDAS.	61
FIGURA 28 - VARIAÇÃO DA TAXA DE FALHA DE UM SISTEMA CONVERSOR PARALELO COM $N + X$ REDUNDÂNCIA.	65
FIGURA 29 - DISPONIBILIDADE DO SISTEMA CONVERSOR PARALELO REDUNDANTE DE $N + X$.	65
FIGURA 30 - ILUSTRAÇÃO DO ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO DINÂMICO DE ENERGIA.	68
FIGURA 31 - DIAGRAMA DO CUSTO TOTAL DO SISTEMA CONVERSOR PARALELO.	70
FIGURA 32 - CUSTO TOTAL DO SISTEMA CONVERSOR DE ENERGIA DE 1000 kW SOB DIFERENTES GRAUS DE REDUNDÂNCIA.	74

FIGURA 33 - CUSTO TOTAL DO SISTEMA CONVERSOR DE ENERGIA DE 1000 kW: DETALHE DO PONTO ÓTIMO.....	74
FIGURA 34 - TAXA DE FALHA DO SISTEMA COM DISTRIBUIÇÃO DINÂMICA DE ENERGIA.	75
FIGURA 35 - DISPONIBILIDADE DO SISTEMA COM DISTRIBUIÇÃO DINÂMICA DE ENERGIA.	75
FIGURA 36 - CUSTO TOTAL DO SISTEMA CONVERSOR DE ENERGIA DE 1000 kW SOB DIFERENTES GRAUS DE REDUNDÂNCIA, COM DISTRIBUIÇÃO DINÂMICA DE ENERGIA.	76
FIGURA 37 - CUSTO TOTAL DO SISTEMA CONVERSOR DE ENERGIA DE 1000 kW SOB DIFERENTES GRAUS DE REDUNDÂNCIA, COM DISTRIBUIÇÃO DINÂMICA DE ENERGIA: DETALHE DO PONTO ÓTIMO.....	77
FIGURA 38 - CUSTO TOTAL DO SISTEMA POR ENERGIA INJETADA NA REDE.....	79

Lista de Tabelas

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PARALELISMO.....	13
TABELA 2 - MÉTODO DE DIAGNÓSTICO PARA O CONVERSOR ANPC TOLERANTE A FALHAS.	28
TABELA 3 - DISPONIBILIDADE E INDISPONIBILIDADE <i>VERSUS</i> CONFIGURAÇÃO.	49
TABELA 4 - TAXA DE FALHA DE CADA COMPONENTE DE UM SISTEMA PRÁTICO MONOFÁSICO (230 V; 5 kW).	60

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivo	4
1.3 Estrutura do Trabalho	5
Capítulo 2 - Estratégias de Paralelismos de Conversores Estáticos.....	7
2.1 Aspectos Gerais de Conversores Estáticos.....	8
2.2 Paralelismo de Conversores Fonte de Tensão e seus Aspectos.....	14
2.3 Tolerância a falhas em Conversores.....	16
2.3.1. Conversor ANPC Tolerante a Falhas.....	18
Capítulo 3 - Introdução a Análise da Confiabilidade de Conversores	21
3.1 Confiabilidade	22
3.2 Ocorrência de Falhas	24
3.3 Tipo de Falhas	24
3.3.1. Falhas em Módulos de Potência.....	25
3.3.2. Falhas em Circuito Aberto	25
3.3.3. Falhas em Curto-Circuito.....	26
3.4 Diagnósticos de Falhas	28
3.5 Prognósticos e Modelos de Estimacão de Vida Útil em Módulos de Potência.....	29
3.5.1. Aspectos Gerais de Modelos Físicos de Predicão de Vida Útil.....	29
3.5.2. Aspectos Gerais de Modelos Empíricos de Predicão de Vida Útil.....	30
Capítulo 4 – A Confiabilidade e a Redundância do Sistema	33
4.1 Aspectos Gerais	33
4.2 Métricas de Previsão de Confiabilidade	34
I. Confiabilidade.....	34
II. Taxa de Falha	34
III. Tempo Médio de Falha	35

IV. Tempo Médio de Reparo.....	35
V. Disponibilidade e Disponibilidade Média.....	36
4.3 Avaliação da Confiabilidade em Sistemas de Eletrônica de Potência	36
I. Modelos de Confiabilidade em Nível de Componentes.....	37
II. Modelos de Confiabilidade em Nível de Sistema ou Subsistema para Sistemas Tolerantes ou Não Tolerantes a Falhas.....	38
4.4 O projeto com Redundância e a Operação Tolerante a Falhas.....	42
I. Necessidade de Tolerância a Falhas.....	43
4.5 Mais Sobre Redundância.....	47
Capítulo 5 – Metodologia de Estudo.....	51
5.1 Quanto à Abordagem.....	51
5.2 Quanto aos Procedimentos	53
5.3 Quanto à Confiabilidade da Operação com Conversor	56
5.4. Quanto à Análise da Confiabilidade do Sistema	59
Capítulo 6 - Estudo de Caso: Avaliação da Confiabilidade e Custos de O&M.....	62
6.1 Caso A: Confiabilidade da Operação com Um Único Conversor.....	63
6.2 Caso B: Confiabilidade dos Conversores Paralelos $N+X$	64
6.3 Caso C: Confiabilidade de Conversores Paralelos $N + X$ Sob Condições de Distribuição Dinâmica de Energia	67
6.4 Análise de Custo Ótimo da Arquitetura do Sistema.....	70
6.5 Custos Operacionais – O&M.....	71
6.6 Análise de Viabilidade de Projeto	77
Capítulo 7 - Conclusão e Trabalhos Futuros	80
REFERÊNCIAS	83

Capítulo 1 - Introdução

Há muito se discute as opções para aumentar a oferta de energia elétrica no Brasil. Nesta seara, por um lado há quem defenda o investimento em usinas hidrelétricas justificável pelo menor impacto ambiental. Por outro lado, outros grupos tangenciam o investimento em usinas termelétricas como solução para ampliar a oferta de energia elétrica por conta da possibilidade de serem alocadas próximas de grandes centros de consumo, além também do seu menor tempo de realização.

No entanto, com o passar dos anos tem sido observado que existem zonas para todas as propostas, dado as proporções continentais do Brasil e suas mais variadas particularidades entre as diversas regiões. Dessa forma, os caminhos tomados apontam para um modelo mais diversificado das fontes de energia, facilitando-se assim o alavancar mais significativo de outras fontes, como a eólica, solar e biomassa, por exemplo.

Neste sentido, a energia renovável vem em ascendência nas últimas décadas, particularmente em 2014, tendo como plano de fundo o aumento do consumo global de energia em conjunto com o declínio substancial nos preços do petróleo. O consumo global aumentou cerca de 1,5% ao ano nestes últimos anos, impelido principalmente pela demanda nos países em desenvolvimento. A considerar-se o aumento na utilização de energia nas últimas quatro décadas, curiosamente na contramão vem a estabilidade nas emissões globais de carbono advindas do consumo de energia, as quais não apresentaram crescimento efetivo em meados da última década (2014 - 2015), enquanto a economia global cresceu. Ao mesmo tempo, em períodos anteriores as reduções eram associadas a desacelerações na economia global, esta estabilização foi atribuída crescimento das fontes de energia renovável e das melhorias na eficiência energética. Neste horizonte, países como México, China e membros da União Europeia anunciaram compromissos relativos a mudanças climáticas, pavimentando o cenário para investimentos em energias renováveis e eficiência energética.

Nesse contexto, há uma crescente conscientização mundial quanto a utilização de energias renováveis e a eficiência energética, não apenas para enfrentar as mudanças climáticas, mas sobretudo para viabilizar o acesso à energia para a parcela da população que ainda vive à margem da sociedade, sem serviços básicos e modernos de energia, e criar novas oportunidades econômicas. Por exemplo, as fontes renováveis de energia são

elementos essenciais nos programas de eletrificação rural em muitos países, e diversos atores internacionais deste setor vem fortalecendo este avanço no acesso à energia por meio de fontes renováveis nos últimos anos [1]. Na Figura 1, é possível observar a cota de energia proveniente de fontes renováveis em 2018, buscando o patamar-objetivo para 2020 dos países europeus e percentuais de consumo final bruto de energia.

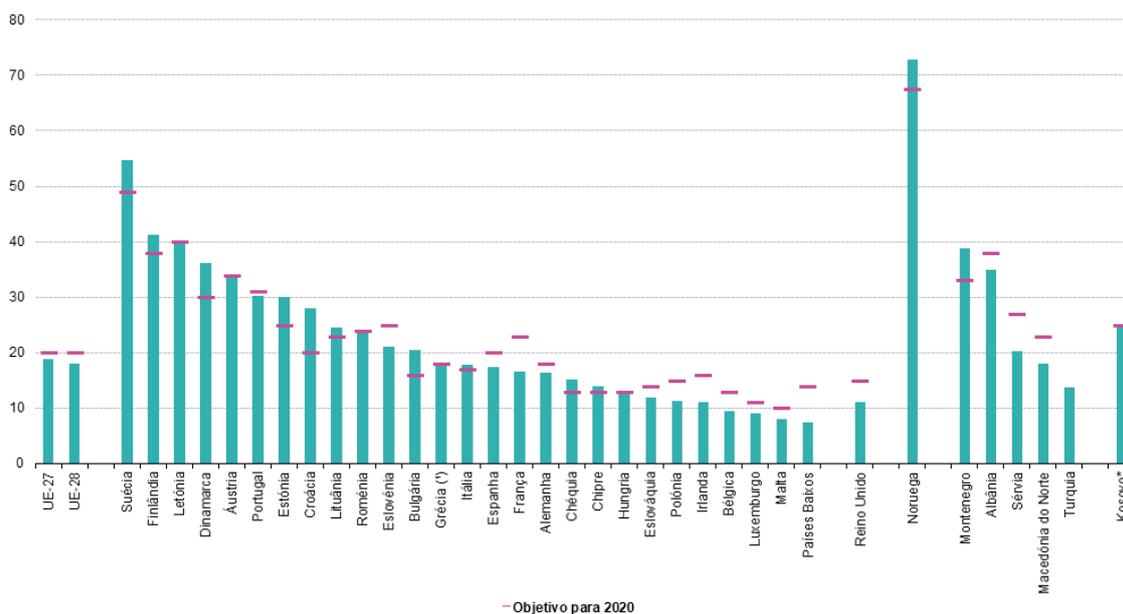


Figura 1 - Cota de energia proveniente de fontes renováveis em 2018, com horizonte em 2020.

FONTE: Eurostat (online data cod: ilc_lvho05a)[2]

De acordo com [3] e [4] assumindo um custo por unidade conversora como aproximadamente constante de \$0,715/W, o custo da instalação será de mesmo modo constante e independente da quantidade de conversores, N . No entanto, escolher N de forma aleatória não é a melhor solução, por ele estar justamente relacionado com a confiabilidade do sistema. Esta confiabilidade influencia diretamente em seu custo operacional, onde incluem perdas de energia, custos de manutenção e reparo e custos de tempo de inatividade, o que em grandes sistemas de transmissão, por exemplo, gera um alto valor a ser pago por hora de indisponibilidade, a chamada PV (Parcela Variável). Embora a confiabilidade do sistema seja otimizada em função da adição de conversores

redundantes X , neles também se deflagram um investimento extra. Algumas pesquisas demonstram que, quando a quantidade de conversores redundantes X aumentam para um determinado valor, a confiabilidade esperada no sistema não melhora de forma interessante [5], [6], [7]. Embora informativa, essa análise qualitativa não fornece uma solução ou método para se determinar o X em sistema distribuído com foco para obter máxima confiabilidade e mínimo custo.

Diversas estratégias de controle foram propostas para ajustar o equilíbrio de potência entre conversores conectados em paralelo [8], [9], [10]. Em um sistema convencional com conversores em paralelo, todos os módulos compartilham igualmente a corrente de carga e, assim, a eficiência em carga leve do sistema é baixa. Em [11] é proposto um método dinâmico de distribuição da energia para reduzir o número de conversores em operação sob carga leve visando programar as funções entre os módulos paralelos em um modo de compartilhamento de tempo, ou seja, um cenário análogo ao controle de compartilhamento de carga média. Esse esquema dinâmico de distribuição de energia apresentou melhorias à eficiência da carga leve do sistema e ao MTBF na operação do conversor.

1.1 Motivação

Diante disso, à medida que a penetração desses recursos de energias renováveis aumenta, os conversores de potência começam a ser empregados em maior escala, sendo utilizados como interface em sistemas de energia, sejam estes sistemas distribuídos ou não. E concomitantemente estimulado pela preocupação com a eficiência energética e a qualidade de energia, a eletrônica de potência começa a tomar espaço.

À vista disto, o estudo e análise dos conversores requer atenção especial quanto ao paralelismo de conversores, conexão utilizada para alcançar um nível de potência expandido e redundância nos sistemas. Esse trabalho trata de forma a avaliar quantitativamente a confiabilidade dos conversores paralelos sob diferentes perspectivas quanto às topologias e estratégias de controle.

Partindo desse princípio, uma busca bibliográfica na literatura acadêmica e industrial nos mostra que os conversores fonte de tensão VSI (*Voltage Source Inverter*) têm sido cada vez mais utilizado para conectar as fontes de energia renováveis aos

sistemas de energia [12], [13], [14]. Para esse tipo de sistema, é desejável se ter um nível de potência expandido e, conseqüentemente, se torna interessante que haja redundância do sistema, pois assim a conexão de tais conversores em paralelo $N+P$ demonstra-se atrativo. A potência dos N conversores em paralelo aumentará a potência de pico e os demais conversores X atuariam como *backup* no que diz respeito a redundância. Então, ao adicionar conversores, espera-se que a confiabilidade do sistema aumente significativamente. Ademais, ao implementar um sistema de alta potência com conversores conectados em paralelo, o custo de manutenção e possíveis substituições em falhas será reduzido.

Assim, a confiabilidade das configurações em paralelo começam a atrair atenção à medida que a geração distribuída se populariza [15], [5], [16]. Segundo [17], uma revisão em mais de 100 sistemas monitorados constatou que 75% das falhas eram por conta dos conversores, com um tempo médio entre falhas (MTBF) entorno de 1,7 ano. Nesta verificação, os dados de custo de O&M (Operação e Manutenção) não foram coletados. Por outro lado, o levantamento ressalta o MTBF dos módulos fotovoltaicos, os quais era na casa de 500 anos. Importante destacar que este fato não significa que o gerador fotovoltaico possa ter uma durabilidade de 500 anos, mas sim que, em 500 desses geradores, pode-se esperar que falhe apenas um no período de 1 ano. Portanto, para aumentar a confiabilidade geral do sistema, o ponto principal está em otimizar a confiabilidade do sistema de conversores, ponto em que reside a motivação deste trabalho.

1.2 Objetivo

Neste trabalho de dissertação de mestrado, além de comparar quantitativamente o método de distribuição de energia com os métodos convencionais em termos de confiabilidade e custo, objetiva-se verificar modelos matemáticos para avaliar quantitativamente a confiabilidade e o custo de sistemas com conversores paralelos redundantes, e assim suscitar uma estrutura metodológica para determinar N e X de modo a otimizar a confiabilidade e o custo do projeto.

Em suma, as contribuições dessa dissertação são:

- Aplicação em um caso base do método de distribuição de energia em comparação com o método convencional para a determinação da configuração do sistema de conversão de energia baseado em conversores eletrônicos de potência;
- Comparação entre os métodos de distribuição de energia e convencional quanto à confiabilidade e o custo de implementação do sistema de conversão de energia através de suas análises no caso base;
- Estudo de uma metodologia para determinação de configuração ótima do sistema com conversores paralelos redundantes.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este estudo está estruturado em seis capítulos.

O segundo capítulo trata das estratégias de paralelismo de conversores estáticos. Primeiramente é apresentada uma breve revisão bibliográfica a fim de classificar as distintas estratégias de conversores, suas particularidades, vantagens e limitações, bem como sua sustentação no avanço da tecnologia. Em seguida, será discorrido sobre conversores estáticos, suas características básicas, seu comportamento quando em associação de N módulos conectados em paralelo, e algumas topologias. Integralizando o capítulo, as topologias dos circuitos serão estudadas e suas influências no propósito deste trabalho, que é a verificação da confiabilidade e custo.

O terceiro capítulo apresenta o princípio da confiabilidade, uma breve introdução da análise de dispositivos e seus pontos altos sob o olhar da confiabilidade de sistemas. Serão definidas métricas a respeito de sua avaliação, como a frequência de falha e manutenção de um componente, a probabilidade de um componente ter uma determinada durabilidade, o tempo médio de operação de um sistema até que ocorra uma falha, entre algumas outras definições como tipos de falhas de forma mais específico, que se fazem necessárias para prosseguir no estudo.

O quarto capítulo estuda a redundância de sistemas e suas implicações na confiabilidade. Com uma introdução dos aspectos gerais sobre o tema, desenvolvendo algumas métricas de previsão confiabilidade em modo complementar ao capítulo anterior, passando pelos níveis de modelos de confiabilidade, alcançando então o projeto com

redundância e a operação tolerante a falhas, com uma breve discussão sobre a redundância a nível de subsistemas.

No capítulo 5, é apresentado o estudo de caso, utilizando toda a base estudada para verificar a confiabilidade da operação com um conversor único, com conversores em paralelo $N + X$ e com Conversores em paralelo $N + X$ sob condições de distribuição dinâmica de energia. Baseado no estudo de caso, será feita uma análise de comparação de confiabilidade. Daí em diante, será fornecida uma análise de custos de otimização do sistema com conversores em paralelo com base nos casos estudados, custos iniciais de instalação e os custos operacionais de O&M e os custos em perdas de energia. Bem como, serão analisados os impactos em um modelo de custo de confiabilidade para encontrar uma estrutura de sistema otimizada. E com este conteúdo é verificada a viabilidade de um determinado projeto.

O sexto e último capítulo apresenta as conclusões do trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros. Em seguida, as referências bibliográficas.

Capítulo 2 - Estratégias de Paralelismos de Conversores Estáticos

Este capítulo é destinado a contextualizar o tema desse trabalho. Desta forma, primeiramente será apresentada uma definição de conversores estáticos de maneira geral com enfoque nos mais utilizados sob a perspectiva das fontes alternativas de energia, com cenários de microrrede isolada e conectada com a rede principal de energia, classificando-os conforme tipos, tecnologias e arranjos, passando pela topologia de circuitos. A partir de então, será feita uma breve passagem quanto às estratégias de controle, basicamente com sinal e sem sinal de comunicação, bem como suas características e limitações, e o tipo de malha de controle para este panorama.

2.1 Aspectos Gerais de Conversores Estáticos

Ao abordar os conversores estáticos de maneira geral é interessante revisar alguns recursos dos VSI, o qual é parte do objeto de estudo neste trabalho. A esse respeito, a Figura 2 mostra a estrutura típica de um VSC. O circuito de potência deste conversor é, de forma geral e simplificada, composto por uma ponte trifásica de IGBT controlada por modulação de largura de pulso (PWM) e um filtro LC, enquanto o sistema de controle de chaveamento é projetado usando o processamento do valor instantâneo da tensão, e busca regular a tensão de saída V_0 no valor de referência senoidal V_{Ref} , sendo V_0 a tensão após o filtro LC. A Figura 2 também mostra a tensão V_{AB} do conversor e que serve de entrada do filtro LC. Vale ressaltar que a tensão de referência V_{Ref} é resultado de controladores projetados para o uso fim do conversor. É sabido que a componente fundamental da tensão V_{AB} é proporcional ao sinal de controle V_{PC} aplicado ao modulador PWM. Após algumas considerações, o estágio de potência e o modulador PWM do VSC mostrados na Figura 2 podem ser representados pelo circuito equivalente da Figura 3. Nesse circuito, o conversor e o modulador PWM são simplificados para uma fonte de tensão V_{AB} .

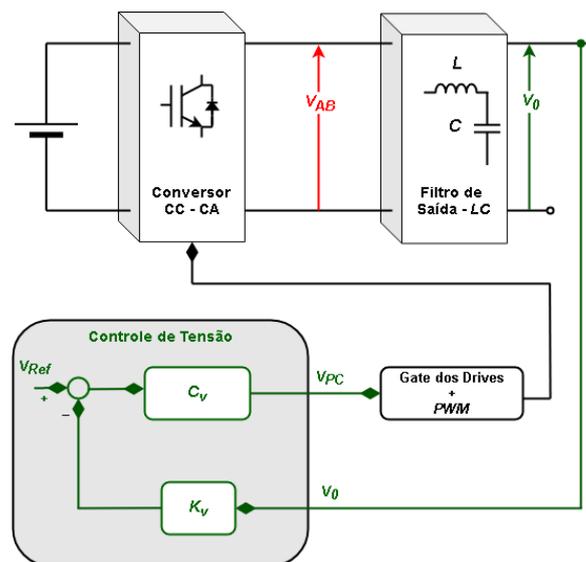


Figura 2 - Circuito Básico de VSC.

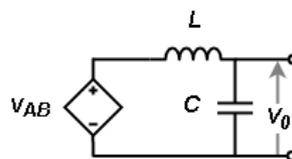


Figura 3 - Circuito equivalente que representa o estágio de potência e o PWM modulador de um VSC.

Os conversores de eletrônica de potência têm desempenhado funções cada vez mais importantes no que diz respeito a acionamentos elétricos veículos e híbridos, na interface com recursos de energias renováveis, sistemas de transmissão de energia e de armazenamento de energia.

Neste estudo e nas aplicações pertinentes, o conversor fonte de tensão trifásico de dois níveis é a topologia que se mostra mais indicada, amplamente difundida e utilizada nas duas últimas décadas [18]. Entretanto, nos últimos anos a indústria tem se manifestado exigindo equipamentos de maior potência para que sejam conectados em redes de média tensão. Por diversos motivos, existe a dificuldade de conectar um único dispositivo semicondutor diretamente na rede de média tensão. E assim, emergiu uma categoria de conversores multiníveis como solução para trabalhar com maiores níveis de tensão [19]. O interesse por essa tecnologia foi introduzido e despertado em 1981 por [20] o qual trouxe a topologia com neutro grampeado de três níveis (NPC). Algumas décadas a frente, [21] empregou a topologia conversora do tipo fonte de tensão de três níveis com neutro grampeado ativo (ANPC), superando a principal deficiência do NPC que era a distribuição desigual das perdas de potência entre as chaves do conversor.

Um ponto relevante e considerado neste estudo é o fato de muitos conversores não contarem com redundâncias, logo qualquer falha que ocorra em um de seus componentes poderia interromper a operação. Em sistemas de transportes, por exemplo, falhas inesperadas podem causar acidentes catastróficos, até mesmo colocando em risco vidas humanas [22]. Outro exemplo ocorre em aplicações submarinas na indústria do petróleo e gás em que uma falha em um conversor, por se tratar de local de difícil acesso, poderá também comprometer a continuidade da operação do sistema, e a necessidade de reparo tornar-se-ia um problema ainda maior pela impossibilidade de ser executado por um operador.

2.1.1. Conversores de Dois Níveis

O conversor fonte de tensão trifásico de dois níveis é a topologia mais utilizada nos últimos anos no que se refere a acionamentos elétricos [18]. Na Figura 4, pode ser observado um ramo de um conversor de dois níveis e suas tensões. Admitindo-se uma tensão no barramento de corrente contínua igual a V_{dc} , a tensão de fase na carga poderá

assumir dois valores, ou $V_{dc}/2$ ou $-V_{dc}/2$. Os valores de perdas na comutação são muito pequenos e assim praticamente desprezíveis, obtendo-se um alto índice de modulação. O circuito de controle para este tipo é bem simplificado, entretanto é pouco adotado na prática por conta do alto conteúdo harmônico, com um THD de aproximadamente de 31% [23]. Técnicas de modulação PWM podem ser adotadas para alcançar uma forma de onda senoidal na saída do conversor, todavia para valores baixos de modulação, os níveis de distorção harmônica podem se tornar impraticáveis para determinadas aplicações.

Pode se dizer que a principal limitação ou desvantagem desta topologia é o nível prático de tensão no barramento de corrente contínua, em que a tensão de bloqueio dos dispositivos semicondutores de potência deve ser compatível com o valor total de tensão existente no barramento. Atualmente no mercado os dispositivos são construídos em sua grande totalidade de silício e atingem com segurança níveis de máximos de tensão de bloqueio de até 6,5 kV. Assim, a topologia de conversor de dois níveis torna-se ineficaz quando desejado para aplicações em média tensão, onde o barramento de corrente contínua poderá atingir valores de até 10 kV.

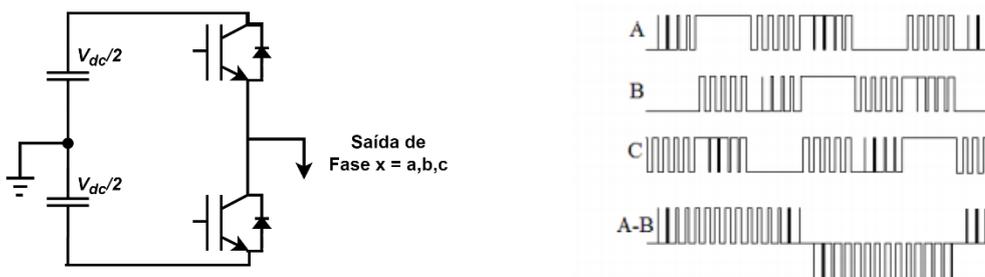


Figura 4 - Conversor fonte de tensão trifásico de dois níveis com estratégia de chaveamento PWM e o padrão de tensões.

2.1.2. Conversores de três níveis NPC

Nas últimas duas décadas, o conversor fonte de tensão de três níveis com neutro grampeado (NPC-VSC) é a solução mais utilizada em aplicações em média tensão [24]. Como exemplo, pode-se citar rede de alimentação de sistemas ferroviários (1,5 kV ou 3 kV), alimentação de motores (4,16 kV), filtros ativos e sistemas de FACTS (*Flexible AC Transmission System*).

A Figura 5 mostra um ramo da topologia do conversor de três níveis NPC. Nele, a tensão total do barramento de corrente contínua é obtida pela soma da tensão nos dois capacitores, C_1 e C_2 , os quais estão conectados ao ponto de neutro “O” do conversor. Diferentemente da topologia de dois níveis, em cada ramo do conversor há quatro IGBTs (Q_x), cada um com um diodo em antiparalelo (D_x). Ademais, essa topologia também contém dois diodos que se conectam ao ponto de neutro para garantir a tensão de bloqueio nas chaves igual a tensão de apenas um capacitor do barramento ($V_{dc}/2$).

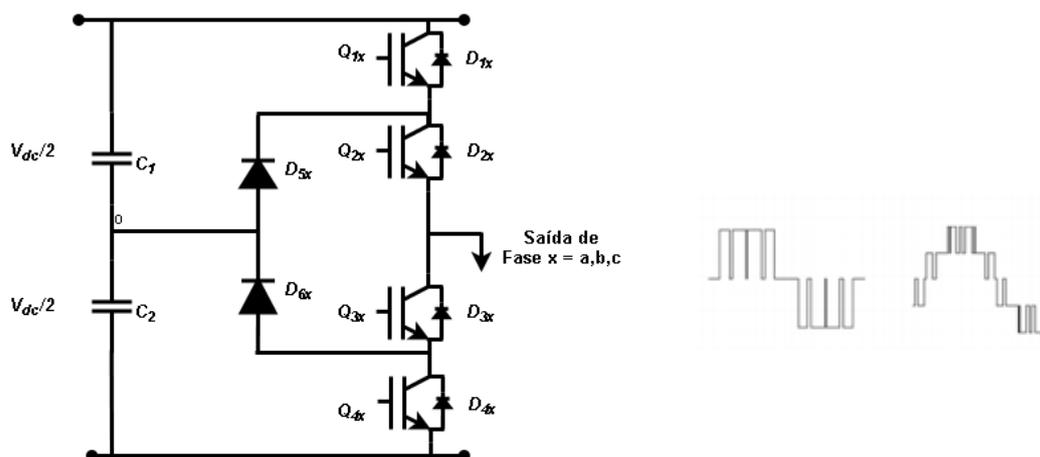


Figura 5 - Conversor fonte de tensão trifásico de três níveis com neutro grampeado e o padrão de tensão do conversor.

2.1.3. Conversores de três níveis ANPC

Como já mencionado anteriormente, a principal desvantagem da topologia conversora NPC é a distribuição desigual de perdas entre os seus dispositivos de potência. Assim, ao adicionar chaves ativas ao ponto de neutro da estrutura da Figura 5, passa a ser possível gerar novos padrões de comutação e equilibrar tanto as perdas quanto a temperatura de junção entre as chaves do ramo deste conversor [21]. A Figura 6 mostra essa configuração.

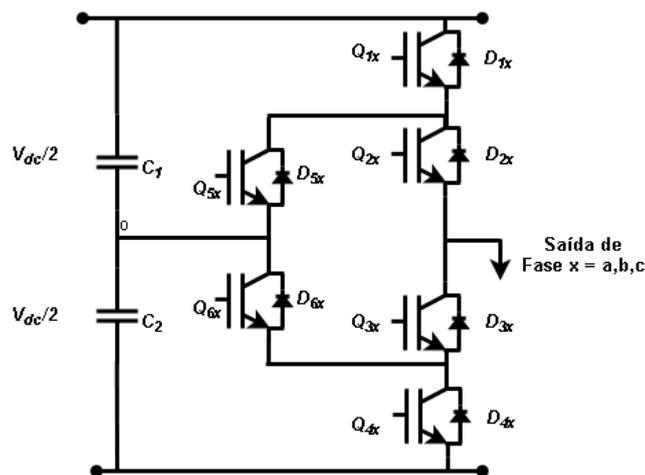


Figura 6 - Conversor fonte de tensão trifásico de três níveis com neutro grampeado ativo.

As duas chaves ativas adicionadas ao ponto de neutro na estrutura ANPC possibilitam novas formas de conexão do ramo do conversor com o ponto de neutro do barramento de corrente contínua. Ao serem acionadas as chaves Q_{5x} e Q_{2x} , a corrente de fase pode ser conduzida pelo caminho de cima em ambas as direções, ocorrendo de forma análoga na parte inferior, quando as chaves Q_{6x} e Q_{3x} são acionadas.

Um conversor tem sua potência limitada pelo estresse térmico em suas chaves. Por conta de se obter uma igualdade na distribuição das perdas entre as fases do conversor ANPC, é possível elevar a potência do conversor ou até mesmo a frequência de comutação.

2.1.4. Estratégias de Controle Aplicados a Paralelismo de Conversores

Esta subseção fará um breve apanhado de alguns tipos de controles convencionais mais utilizados e explorados na literatura. O intuito é dar base ao entendimento do funcionamento das unidades operando em paralelo. Dessa forma, se faz necessário ter prévio conhecimento de alguns conceitos para se ter em mente qual utilizar em projeto de um sistema de conversão de energia que integra múltiplas unidades conversoras.

Dentre eles, destacam-se basicamente dois grupos: Controladores com e sem comunicação, o método Mestre/Escravo pelo grupo dos controladores com comunicação e método de controle por inclinação (*droop control*) pelo grupo sem comunicação são exemplos.

Existem outras opções, não abordadas diretamente neste trabalho, uma vez que não é o foco do estudo, que utilizam diferentes estratégias de controle a fim de garantir a operação em paralelo de conversores conforme as referências citadas neste capítulo.

A Tabela 1 apresenta um resumo das quatro estratégias estudadas, nas quais três são com conexão e uma sem conexão entre os controles.

Tabela 1 – Características das estratégias de Controle de Paralelismo.

Características	Tipo de Sistema de Controle			
	Mestre/Escravo	Central	Distribuído	Curva de inclinação (Droop)
Conexão entre os outros conversores	Sim	Sim	Sim	Não
Grau de redundância	Baixo	Baixo	Médio	Alto
Eficiência do Controle no paralelismo	Alto	Alto	Alto	Médio
Paralelismo feito através do controle de:	Corrente	Corrente Ou Potência	Corrente Ou Potência	Potência
Grau de Complexidade do Controle	Médio	Baixo	Médio	Baixo
Resposta da Dinâmica do Paralelismo	Baixa	Média	Média	Baixa
Desvio de Frequência com aumento da carga	Não	Não	Não	Sim

Neste sentido, entende-se que a comunicação entre conversores facilita a implementação e eleva o desempenho do controle do paralelismo. Entretanto, torna-os dependentes entre si o que, na contramão, vem dificultar a construção da redundância de sistemas que serão abordadas nos capítulos mais adiante. Além do mais, na escolha da estratégia é necessário considerar a complexidade do sistema de controle, a sua resposta dinâmica e o sincronismo com a rede de energia, uma vez que são todos diferentes.

Diante desse contexto, é observado que, ao considerar o tipo de aplicação e do objetivo que se deseja atingir, uma ou outra técnica de controle poderá se tornar mais atrativa ainda não há uma estratégia aplicada em paralelismo de conversores de tensão consolidada.

Em algumas situações o paralelismo de conversores é utilizado para aumento da capacidade instalada e criar sistemas redundantes de modo a avaliar a confiabilidade com a meta de minimizar os custos.

Em geral, busca-se conversores modulares, independentes, que possibilitem ser conectados ou desconectados do paralelismo sem desligar a carga.

A fim de que não haja desequilíbrios entre os conversores, é necessário um controle de paralelismo eficiente a fim de que não haja desequilíbrios entre os conversores, além do sincronismo com a rede de energia. Dessa forma, os controles Distribuídos e de *Droop* mostram-se mais apropriados. Porém, é notório que ambos apontam vantagens e desvantagens, logo ainda há a necessidade de novas estratégias que atendam todas as exigências para este tipo de aplicação.

2.2 Paralelismo de Conversores Fonte de Tensão e seus Aspectos

Partindo do princípio de que os conversores controlados por tensão estão em sincronismo, a conexão entre eles poderá se dar sem um controle específico para o paralelismo pois as diferenças entre as tensões estarão aplicadas sobre as indutâncias de conexão. Dessa forma, esses elementos se constituem na responsabilidade de garantir o funcionamento e a distribuição de carga entre os conversores em paralelo. Neste caso, há que se considerar as desvantagens do surgimento de dificuldade de regulação estática e de THD (Distorção Harmônica Total) por não se ter mais a tensão da carga controlada.

Quando uma microrrede opera de forma isolada da rede elétrica de distribuição, conversores em paralelo devem possuir um controle que permita compartilhar a demanda de carga de modo proporcional à sua potência nominal, manter a estabilidade da microrrede de forma a garantir que a frequência e a tensão estejam nos limites pré-estabelecidos. Uma vantagem de se utilizar conversores para conexão de fontes primárias

de energia ao barramento de corrente alternada (C.A.) da microrrede é o fato de se tornar possível controlar a corrente e a potência daquelas fontes.

No caso de paralelismo de conversores em que a microrrede isoladas, os conversores operam no modo de controle de tensão, e nele deve-se garantir a distribuição da corrente de carga de forma nominal em cada conversor. Quando conectados à rede, de outra forma, operam em modo de controle de corrente, onde se pode determinar a potência que será processada por cada conversor. Esta é uma nuance vista em [25].

Os conversores com controle de tensão são conversores nos quais as saídas possuem características de fonte de tensão, conforme mostram a Figura 2 e Figura 3. A conexão de fontes de tensão ideais em paralelo é possível somente no caso em que elas apresentem fase, amplitude e frequência idênticas. Embora conversores comportem-se como fontes de tensão não ideais, a teoria de circuitos elétricas deve ser levada em consideração e, caso isso não ocorra, haverá circulação de correntes indesejadas entre eles que serão apenas limitadas por suas impedâncias internas. Devido a essas e outras limitações, diversas técnicas de controle foram desenvolvidas para o paralelismo de conversores, principalmente para fontes de energia ininterruptas. Estas técnicas são divididas basicamente em duas classes: com comunicação e sem comunicação entre os conversores. Os controles centralizados, mestre/escravo (*master/slave*) e distribuídos são exemplos de técnicas com comunicação, já o controle por inclinação (*Droop Control*) não necessita de comunicação [26]. Contudo, no que diz respeito a microrrede, apenas o controle mestre escravo e o *droop control* são utilizados, visto que as outras duas mencionadas consideram que as cargas são centralizadas, o que não é verdade generalizada. Outra limitação para o uso dessas técnicas é o fato delas enviarem o sinal instantâneo de corrente e tensão, e como os conversores em uma microrrede estão em distâncias diferentes, a interferência de ruídos é um fator presente e pode ser prejudicial no envio de sinais analógicos. Por sua vez, o controle mestre/escravo em um conversor faz o papel de mestre e os outros operam como escravos, com o primeiro definindo. No barramento C.A. a tensão e a frequência e os demais conversores seguem esta tensão como referência imposta pelo mestre [27]. Já pelo *droop control*, amplamente usado no compartilhamento da demanda de carga entre conversores em paralelo de uma microrrede, este necessita somente da medição local de cada conversor para definir a tensão referencial de saída [28].

Embora tenha a seção 3.3 no capítulo a diante que trate com mais detalhes das falhas, nesta próxima seção será feita uma breve abordagem simples a respeito das falhas e da tolerância a falhas nos tipos de conversores apresentados acima.

2.3 Tolerância a falhas em Conversores

Observando o diagrama da Figura 7, vê-se o estado da arte das principais metodologias de tolerância a falhas, os quais estão divididos em quatro níveis.

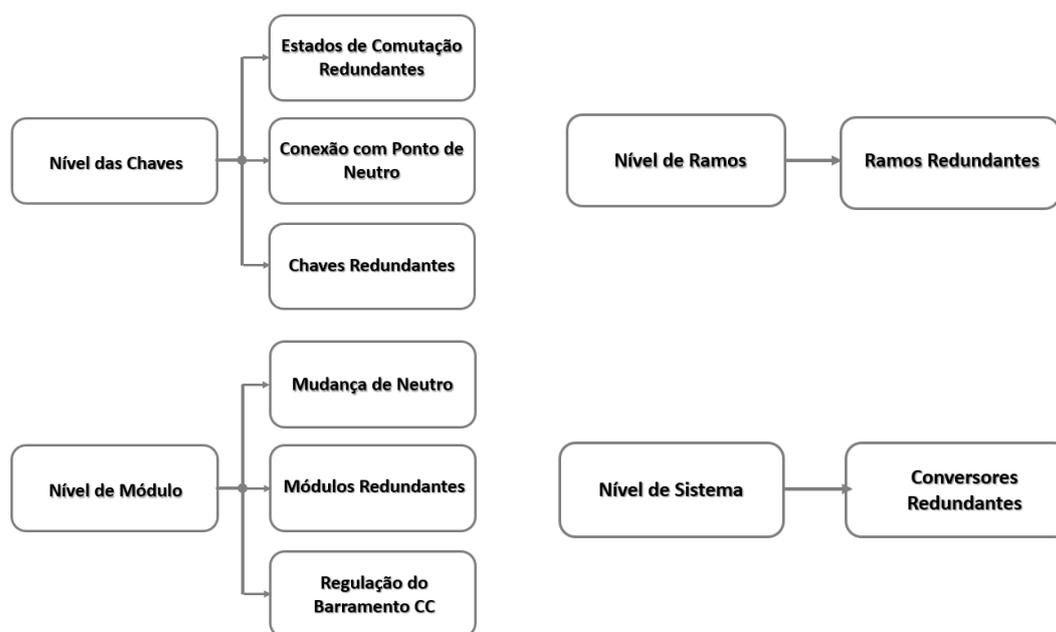


Figura 7 - Principais métodos de Tolerância a Falhas.

Adaptado de [29]

Diversos conversores multiníveis existentes e utilizados na indústria são considerados circuitos redundantes em nível de chave, desde que algumas chaves sejam adicionadas, em comparação ao conversor tradicional de dois níveis. À vista disto, há uma redundância inerente por conta das várias combinações dos estados de comutação do sistema trifásico que geram a mesma saída. Portanto, tal tolerância pode ser atingida examinando estes estados de comutação caracteristicamente redundante [29].

Pra um sistema tolerante a falhas, o seu diagnóstico torna-se a primeira etapa após sua ocorrência. Uma detecção e proteção precisas e oportunas podem evitar propagações desastrosas. Quanto à operação as operações tolerantes a falhas, que consistem no isolamento e reconfiguração destas é o passo seguinte, etapa esta, que se baseia no projeto

de redundância de *hardware* e no controle correspondente, a qual há inúmeras soluções relatadas na literatura nesta subseção.

Com base no tipo de redundância de *hardware*, os métodos de solução são classificados de acordo com a Figura 7 e são classificados em quatro categorias: Nível de Chaves, Nível de Ramos, Nível de Módulo e Nível de Sistema.

- Nível de Chaves – Para esta classificação, vários métodos tolerantes a falhas são investigados exaustivamente, como estados de chaveamento inerentemente redundantes [30] [31], [32], [33], conexão com ponto médio de barramento [34], [35], [36] e instalação de chaves redundantes paralelas ou em série [37], [38], [39].

A grande maioria dos conversores multinível são considerados circuitos redundantes em Nível de Chave, sendo esse o principal método de tolerância a falhas [30]. Neste método algumas chaves são adicionadas em comparação com conversores básicos de dois níveis, e conseqüentemente é formada uma redundância inerente em que várias combinações de comutação trifásica correspondem a mesma saída. E assim, explorando esses estados de chaveamento a tolerância a falhas poderá ser alcançada. Já com a reconfiguração do nível de chaves é conectar o conversor com defeito ao ponto médio do barramento CC por meio de chaves adicionais [36]. O outro cenário vem da utilização de chaves redundantes em conexão paralela ou em série com as chaves principais [38].

- Nível de Ramos – Quanto aos cenários de nível de ramos, a principal abordagem é adicionar ramos redundantes em paralelo ou em série com os ramos principais, ressaltando que o modo paralelo atinge um maior compromisso entre custo e desempenho do sistema [40], [41], [42], [43]. De forma sucinta, remete a adição de ramos extras em paralelo com os ramos principais, sendo um solução poderosa, uma vez que o ramo redundante poderá substituir o danificado, garantindo então o comportamento normal do conversor após a falha [43].
- Nível de Módulos – Nesta categoria, são topologias típicas com redundância a utilização dos conversores multinível modulares CMC e MMC. Nestes são empregados a mudança de neutro, reconfiguração do barramento CC e a instalação de módulos redundantes [44], [45], [46].

Sobre a mudança de neutro, após a falha, o número de módulos operativos em cada fase é desigual, logo os deslocamentos de fase entre as três referências de tensão de fase são ajustadas para manter as tensões de linha equilibradas [46]. Outra técnica é o método de configuração do barramento CC, o qual tentará manter a tensão de saída inalterada aumentando a tensão de entrada. O aumento da tensão pode ser normalmente compartilhado pelas três fases através da combinação do cenário anterior, de deslocamento do neutro [45], [46].

- Nível de Sistema – O método a nível de sistema, é basicamente um ou vários conversores extras e/ou redundantes para reconfiguração de falhas do sistema. Exibe-se como um método mais caro, porém tem sido empregado largamente em aplicações industriais. Duas topologias comuns neste cenário são utilizadas são o conversor redundante em cascata e o conversor redundante em paralelo [47], [48]. O conversor adicional redundante poderá ser operado no modo *backup* “frio” ou “quente”. Este último será o método utilizado neste estudo.

2.3.1. Conversor ANPC Tolerante a Falhas

O conversor ANPC é um exemplo de topologia de conversor determinada levando em consideração a tolerância à falha do sistema. Em [29], os autores apresentam alguns critério de comparação entre as estratégias de tolerância a falhas para conversores multiníveis. São elas: o custo, a performance da saída e confiabilidade.

O custo, parte deveras importante no processo, aumenta com incremento de dispositivos extras na topologia, bem como alguns dispositivos semicondutores, que serão sobre dimensionados para determinadas operações de tolerância a falhas.

Na performance da saída, frente à uma ação tolerante a falhas, alguns fatores devem ser levados em consideração e avaliados como o THD das tensões de saída, eficiência e também a resposta dinâmica do sistema.

A confiabilidade, parte foco deste estudo, é uma métrica importante para avaliar a performance geral da topologia tolerante a falhas. Por exemplo, quantos e quais os tipos

de falhas podem ser superados pelo conversor e qual o percentual em ganho de confiabilidade isto poderá agregar.

Com base nestes critérios de avaliação, os autores em [49] desenvolveram e propuseram uma topologia de conversor ANPC capaz de tolerar falhas sucessivas antes da parada total do conversor. Uma fase deste conversor é exibida na Figura 8, onde observa-se uma estrutura semelhante à do conversor ANPC tradicional (Figura 6), com exceção da adição de duas chaves mais externas, Q_{5xT} e Q_{6xB} , e uma chave comutadora de dois polos S_x .

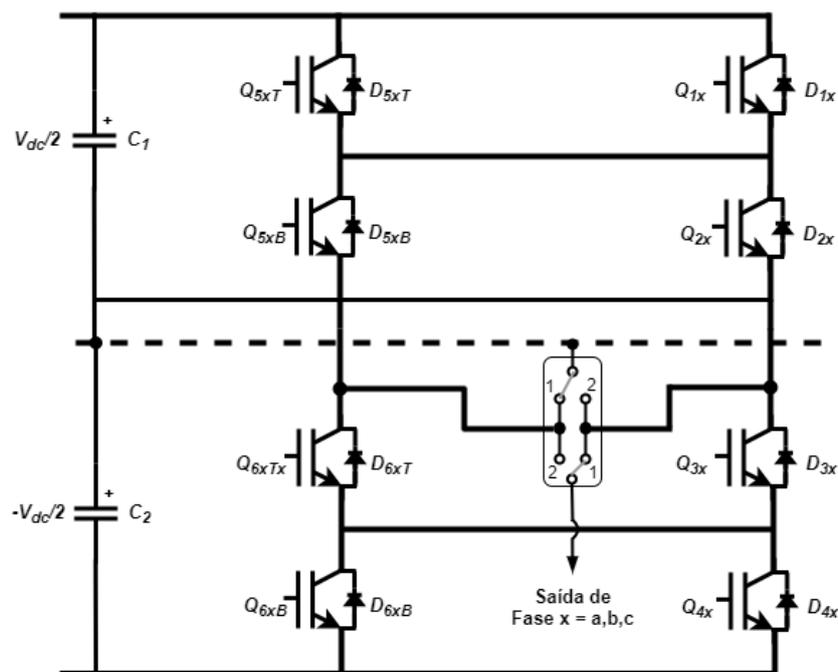


Figura 8 - Uma fase do Conversor fonte de tensão trifásico de três níveis com neutro grampeado ativo e tolerante a falhas.

Com estas alterações, que podem ser visualizadas na estrutura completa da Figura 9, a capacidade de reconfiguração reversível deste conversor possibilita que cada ramo atue como fase ou como ‘grampo’. Dessa forma, por software torna-se possível fazer com que este conversor opere como NPC ou com ANPC, possibilitando assim explorar as vantagens de cada topologia quando for conveniente.

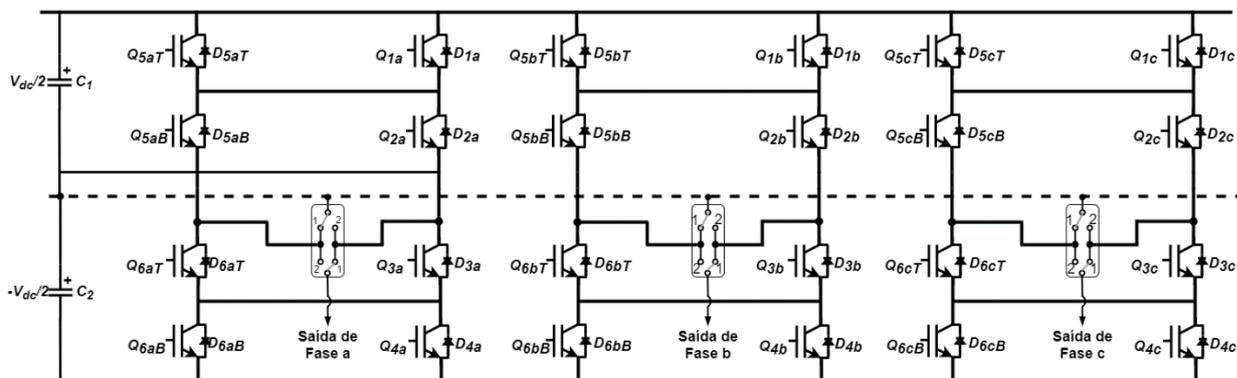


Figura 9 - Estrutura completa do Conversor fonte de tensão trifásico de três níveis com neutro grampeado ativo, tolerante a falhas.

A vantagem mais importante desta estrutura é a capacidade de ser reconfigurada após uma falha em circuito aberto em seus dispositivos. Qualquer falha em uma de suas chaves externas poderá ser superada de forma *online* utilizando-se apenas da intercalação de comando entre seus dispositivos via *software*. De outra maneira, caso ocorra um evento de falha em uma de suas chaves mais internas, o conversor interrompe seu funcionamento para que a chave comutadora “ S_X ” seja operada, a qual, no estudo em referência, ainda é uma chave mecânica.

Capítulo 3 - Introdução a Análise da Confiabilidade de Conversores

Neste capítulo será abordada a confiabilidade de conversores de potência. Inicialmente são apresentadas as definições a respeito das falhas nos módulos de potência, que possibilitem a avaliação da frequência de falha de um componente e também a frequência com que sua manutenção é executada. No tocante a análise dos resultados, são apresentadas técnicas de diagnósticos, prognóstico, formas de monitoramento das condições e formas de estimar a vida útil dos componentes de potência e os tipos de falhas mais recorrentes.

3.1 Confiabilidade

De acordo com [50], a confiabilidade é definida como a capacidade de um componente ou dispositivo proceder uma determinada função em condições pré-estabelecidas, por um determinado período de tempo, a qual é constantemente medida pela probabilidade de falhas, frequência de falhas ou em termos de disponibilidade. A natureza ou fundamento da confiabilidade consiste, exatamente, em prevenir falhas. Nesse campo, o setor industrial vem desempenhando um papel importante, avançando seu desenvolvimento e deixando de utilizar métodos tradicionais, e até mesmo ultrapassados, e buscando novas formas, como por exemplo o processo de *design for reliability* (DFR) [51]. O projeto para confiabilidade, traduzindo DFR, é um processo conduzido por ocasião da fase de desenvolvimento do componente ou do sistema, processo este responsável por garantir que nível de confiabilidade seja alcançado.

No âmbito de conversores de eletrônica de potência, a confiabilidade transformou-se em uma das maiores preocupações em aplicações industriais, sobretudo tratando-se do uso de dispositivos com alta capacidade de potência. Contudo, de acordo com [52], as pesquisas sobre confiabilidade na área de eletrônica de potência tem avançado com as seguintes características:

- 1) Não utilização perfeita da aproximação específica pelo DFR e seus projetos;
- 2) Confiança irrestrita nos valores calculados de tempo médio para falhas (MTTF), de MTBF e na “curva da banheira”, mostrada na Figura 10.

Este gráfico demonstra a operação dividida em 3 períodos distintos: uma fase inicial com falhas prematuras (referente a qualidade do componente), uma faixa constante relativa a falhas aleatórias e a terceira faixa relativa à durabilidade do dispositivo (o desgaste). Embora esta aproximação seja consistente em alguns casos práticos reais, ao considerar as falhas aleatórias em modo constante estas podem ser falsas, sendo não-identificadas as causas reais dos diferentes modos de falhas[53]. Já as considerações de MTBF e MTTF não incluem as falhas por desgaste, desconsiderando a durabilidade. Logo, de uma maneira geral, os valores calculados geram um sensível grau de imprecisão caso uma falha por desgaste ocorra naquele período de tempo.

- 3) Por fim, uma confiança ilimitada em métodos e literatura baseados em modelos estatísticos nos quais as taxas de falhas são previstas desconsiderando

o ciclo térmico, a alteração da taxa de falhas do material do dispositivo, combinações de ambiente e variações na alimentação de energia do sistema.

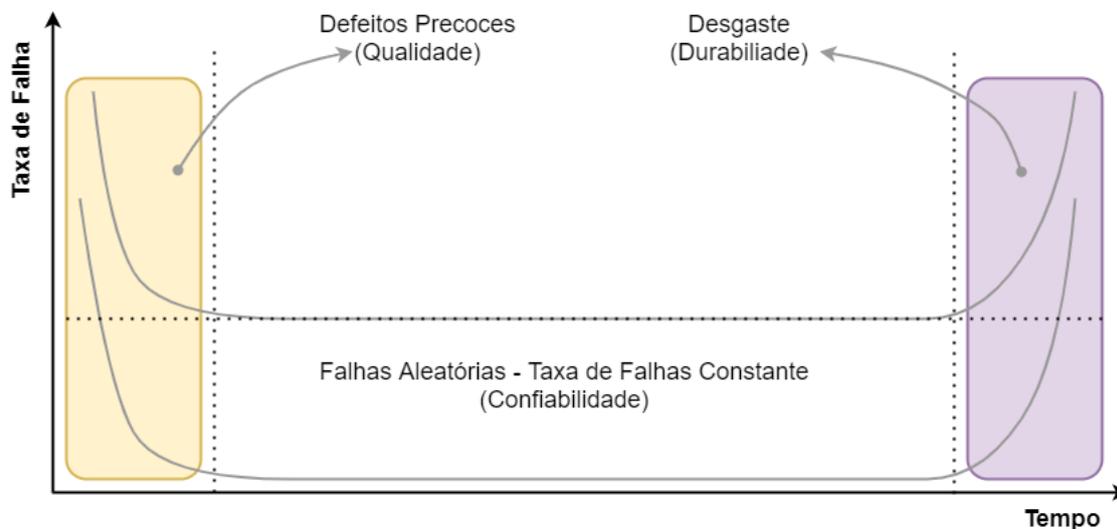


Figura 10 - "Curva da Banheira".

Adaptado de [54]

As pesquisas em confiabilidade em eletrônica de potência, com a alteração nas suas referências e paradigmas, tem vencido as metodologias utilizadas em livros estatísticos e se avizinhou cada vez mais para as abordagens com base física, proporcionando assim maior compreensão das causas das falhas e defeitos de projeto [38]. No conversor propriamente dito, o dispositivo de eletrônica de potência é um dos componentes mais suscetíveis a falhas [55]. Pelo estudo apresentado em [56], as falhas nos semicondutores e nas soldas dos módulos dos conversores somam 38% das falhas do sistema. Aspectos relativos à variação de temperatura, dentro ou fora dos dispositivos, é causa fonte de maior impacto na confiabilidade destes componentes e contabiliza cerca de 55% das causas de falhas, conforme é observado na Figura 11 a seguir.

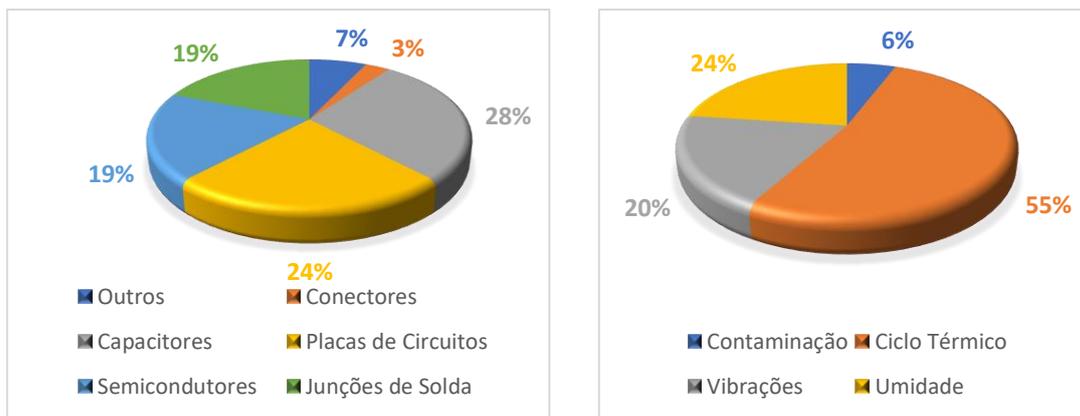


Figura 11- Distribuição de Falhas em Conversores de Potência e as Causas-Fonte.

Fonte: [40]

3.2 Ocorrência de Falhas

A ocorrência de falhas nestes sistemas pode comprometer severamente a produção das plantas, portanto o aumento da confiabilidade necessário. Dada esta preocupação, sistemas de aterramento e de proteção vêm evoluindo, como por exemplo um conversor operando com estratégia de chaveamento PWM (*Pulse Width Modulated*) em um sistema não aterrado exige uma análise mais cautelosa. Caso este conversor esteja acionando um sistema com falha de isolamento para a terra, como um motor elétrico de indução, em um primeiro estágio o acionamento pode não ser interrompido por conta da atuação das proteções existentes. Porém, podem ser esperadas sobretensões as quais podem levar à falha do isolamento do conversor, avaria no equipamento e uma parada indesejada e não programada do sistema.

3.3 Tipo de Falhas

Essa seção busca explanar qualitativamente os tipos de falhas mais comuns que podem ocorrer nesses equipamentos.

3.3.1. Falhas em Módulos de Potência

Os módulos de potência são tipicamente classificados em dois tipos: os conectados por fios e os conectados por pressão. Os primeiros têm por característica apresentarem maior resistência térmica, porém menores densidades de potência e maiores taxas de falhas devido às junções de solda e suas conexões nas pastilhas internas. Por outro lado, os conectados por pressão utilizam a tecnologia por encapsulamento e não tem a necessidade de conexões por fios, melhorando assim a confiabilidade bem como a densidade de potência e também a capacidade de resfriamento do módulo. Contudo, na área da eletrônica de potência, os módulos conectados por fios são os tipos mais utilizados em razão do seu valor de compra e custo de manutenção [57].

3.3.2. Falhas em Circuito Aberto

Quando se aborda falhas em módulos de potência, como em IGBTs por exemplo, pode-se ressaltar falhas no *Gate* do *driver* e o rompimento dos fios de conexão.

Ao comentar as falhas no *Gate* do *driver*, são diversas a serem destacadas, como os danos em seus dispositivos de potência (MOSFET, BJT) e a desconexão entre a placa de acionamento e o IGBT. Esse tipo de falha pode danificar o IGBT, levando a degradação da tensão de saída e esgotamento de outros IGBTs e dos capacitores também. Picos de sobretensão podem romper a resistência de *Gate*-emissor quando estes picos acontecem entre o coletor e o emissor. Por outro lado, picos de sobrecorrente podem evidenciar o desgaste da resistência. Alguns IGBTs mais modernos podem operar com temperaturas de até 175°C na junção, enquanto outros componentes do *Gate* do *driver* não apresentam bom funcionamento em altas temperaturas, comprometendo então a confiabilidade do sistema [58].

Abordando as falhas por rompimento dos fios de conexão, estas são principalmente causadas por trincas na interface do fio e a pastilha de silício por conta das variações de temperatura e as diferentes (CET) Constante de Expansão Térmica. A

deformação ocorre de forma diferente nos dois materiais, o que acarreta uma depleção na interação na interface dos materiais, onde esse estresse causado vai depender da temperatura. Em testes de fadiga com altas variações de temperatura, as trincas propagam-se das extremidades para o centro do condutor de alumínio, e quando esta alcança o centro, os fios de conexão se desprendem, acontecendo assim a falha no módulo [59]. Falhas por rompimento dos fios de conexão têm sido observadas em MOSFETs, IGBTs e diodos de roda livre, e são consideradas o principal mecanismo de falhas de eletrônica de potência [60].

3.3.3. Falhas em Curto-Circuito

Particularmente, o módulo IGBT pode apresentar três tipos mais característicos de modos de falhas diferentes durante um curto-circuito: falhas por alta temperatura do silício, o travamento do IGBT e falhas de sobretensão.

No curto-circuito, considerando as falhas por alta temperatura no silício e observando a Figura 12, o V_{DC} é mantido constante, enquanto a corrente I_c aumenta continuamente alcançando valores mais elevados do que a corrente nominal do dispositivo. Logo, uma grande quantidade de energia é perdida pelo IGBT e a temperatura sobe instantaneamente. Caso a temperatura exceda o nível crítico, o módulo IGBT perderá a capacidade de bloqueio e a tensão V_{CE} irá colapsar e conseqüentemente ocorrerá a destruição do componente [61].

Quanto as falhas por travamento do IGBT, a junção base-emissor perde a função devido a uma resistência parasita, a qual cria um circuito paralelo que interrompe o controle da comutação do módulo IGBT através do *Gate*. Quando a corrente I_c chega em um valor muito alto, como da corrente de curto-circuito, este circuito parasitas do GBT pode iniciar a condução, causando a destruição do componente em razão de sua alta corrente e da energia dissipada em seus fios de conexão [61].

No tocante a falha de sobretensão em curto-circuito, esta ocorre quando o V_{CE} ultrapassa o limite especificado. O valor da corrente I_C torna-se igual a corrente de curto-circuito, concentrando-se em uma região muito estreita do silício, resultando na elevação

da temperatura de forma pontual, fazendo com que o dispositivo perca sua capacidade de bloqueio. Logo, a tensão V_{CE} aumenta e o componente entra em colapso em alguns nanossegundos [61].

Esta sobretensão no IGBT por ocasião do desligamento ocorre por resultado da distribuição da energia armazenada na indutância de comutação sempre que a corrente flui através do IGBT, no elo CC e no banco de capacitor. O circuito equivalente em questão pode ser observado na Figura 12.

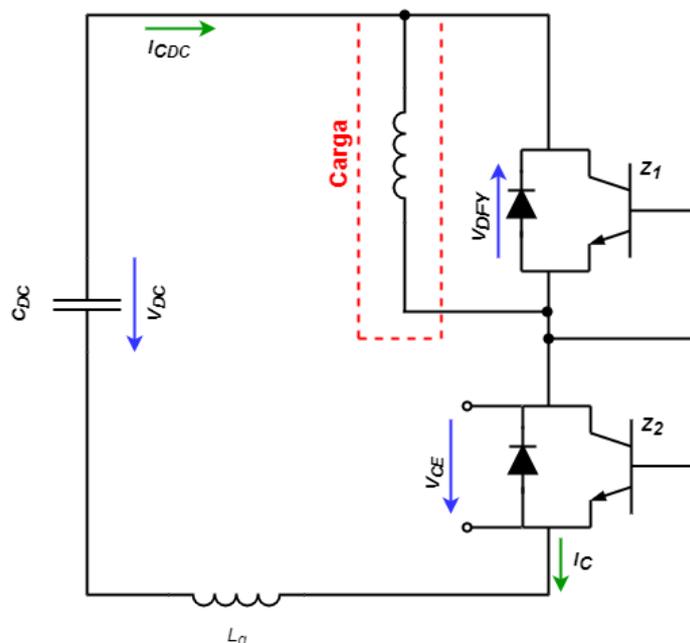


Figura 12 – Circuito Equivalente para Comutação.

Adaptado de [44]

A partir da Figura 12, a tensão V_{CE} pode ser desenvolvida como:

$$V_{CE} = V_{DC} + \frac{L_q dl_c}{dt} + V_{DFY} \quad (1)$$

Onde:

L_q – Indutância no elo CC;

V_{DFY} – Tensão de recuperação, geralmente entre 10 e 50 V.

Com base na literatura, a elevação da tensão V_{GE} e V_{CE} desencadearam estudos, nos quais foram desenvolvidos em [62] a proposta de um sistema de proteção do IGBT partindo do aumento da tensão entre o coletor e o emissor. De forma mais real, resultados

experimentais apresentados em [63] apresentaram também picos de tensão de 1280 V durante um dos testes de curto-circuito. Portanto, o aumento da tensão V_{CE} reflete em oscilações de tensão no *Gate* IGBT, podendo assim alcançar valores de críticos, levando então a sua destruição ou até mesmo de componentes utilizados no controle de comutação.

3.4 Diagnósticos de Falhas

Em um sistema tolerante a falhas, o diagnóstico é o fator preponderante.

Foi proposto um estudo afim diagnosticar falhas em módulos de potência IGBT por circuito aberto aplicáveis em conversores NPC e ANPC em [64]. Quando as informações da corrente de fase e os estados de comutação estão no sistema, são apenas adicionados três sensores de tensão para implementar o referido método de diagnóstico. De modo que um conversor ANPC tolerante a falhas trabalhe como um conversor NPC ou ANPC comum e, sendo conhecida a sua configuração atual, com o auxílio da Tabela 2 a seguir é possível diagnosticar a falhas nas chaves, bem como são observadas as variações da polaridade da tensão nas diferentes condições de falha, em consonância com a Figura 8.

Tabela 2 - Método de diagnóstico para o conversor ANPC tolerante a falhas.

Chave em Falha	Estado	Corrente	Tensão Medida	Tensão Esperada
Q1x/Q5xT	+	$I_a > 0$	Zero	$V_{dc}/2$
Q2x/Q5xB	0U1 ou 0L2	$I_a > 0$	$-V_{dc}/2$	Zero
Q3x/Q6xT	0L1 ou 0I2	$I_a < 0$	$V_{dc}/2$	Zero
Q4x/Q6xB	-	$I_a < 0$	Zero	$-V_{dc}/2$
Q5xB/Q2x	0U1 ou 0U2	$I_a < 0$	$V_{dc}/2$	Zero
Q6xT/Q3x	0L1 ou 0L2	$I_a > 0$	$-V_{dc}/2$	Zero

3.5 Prognósticos e Modelos de Estimação de Vida Útil em Módulos de Potência

O prognóstico é uma forma de traçar o provável desenvolvimento futuro ou o resultado de um processo. Para o estudo em questão, irá prever a condição de operação em um ponto futuro e estimar a fim de estimar a vida útil do módulo IGBT sob suas condições de uso. Atualmente, alguns modelos de estimação de vida útil são utilizados de modo a prever o tempo de vida dos cabos de ligação e das soldas quando sob condições de cargas cíclicas, conforme salientado em [65]. Tais modelos são desenvolvidos sobretudo considerando falhas por desgaste por fontes de estresse como temperatura, tensão, corrente, vibração, umidade e radiação térmica [56]. Estes modelos podem ser agrupados em: Modelos Físicos e Modelos Empíricos.

3.5.1. Aspectos Gerais de Modelos Físicos de Predição de Vida Útil

Para os modelos físicos não se faz necessário conhecer o número de ciclos térmicos e tampouco sua amplitude, mas é necessário o conhecimento dos mecanismos de falha [66].

Quando se trata do modelo físico de estimação de tempo de vida útil nas junções das soldas, este pode ser pautado no estresse, tensão, energia e no dano. Assim, segundo [56], os modelos mais precisos e com resultados mais convincentes são os baseados em energia. De acordo com a equação (2) e proposta por [67], pode ser estudado um modelo de fadiga baseado na energia total de deformação.

$$N_f = \left(\frac{\delta W_{total}}{W_0} \right)^{1/k} \quad (2)$$

Onde:

N_f – é o ciclo médio considerado na falha;

W_{total} – é a energia total de deformação;

W_0 – Coeficiente de fadiga e igual a 0,1573;

k – Coeficiente de fadiga e igual a -0,6342, esses dois coeficientes de fadiga são calculados através de resultados experimentais na junção das soldas.

Por outro lado, quando é observado o modelo físico de vida útil de fios de ligação, o modelo mais comum é o chamado de modelo de fadiga. Esse modelo é baseado na deformação plástica, ou seja, considera-se que tais fios estão sob o regime de deformação devido à larga diferença termomecânica entre o Silício e o Alumínio. A cavidade existente é preenchida com gel de silício e coberta com uma tampa de material plástico de encaixe e os fios formam as conexões entre o *chip* e interior do módulo. Uma falha nesta interconexão é um dos fatores de limitação de vida útil mais importantes para a confiabilidade dos módulos IGBT [68]. Logo uma estimativa tempo de vida útil para estas conexões é fundamental para um bom projeto de confiabilidade e avaliação de todo o módulo.

Este modelo é baseado na relação existente na potência dentro do número de ciclos para a falha N_f e a deformação plástica induzida por ciclo (ϵ_{pl}) sendo observado na equação (3) a seguir:

$$N_f = C_1 \cdot (\epsilon_{pl})^{-c_2} \quad (3)$$

Onde:

C_1 e C_2 são coeficientes obtidos através de resultados experimentais baseado em elementos finitos.

3.5.2. Aspectos Gerais de Modelos Empíricos de Predição de Vida Útil

Esta abordagem se dá em uma forma tradicional, na qual faz uso da hipótese de falha constante no cálculo da confiabilidade do sistema, utilizando-se de dados empíricos encontrados nos manuais.

A confiabilidade do módulo IGBT é definida pelo tempo de vida B_{10} , o qual é descrito como o número de ciclos em que 10% de um conjunto de módulos falham [69].

As curvas observadas nas figuras a seguir, denotam o tempo de vida B_{10} e são geradas utilizando modelos de tempo de vida e perfis de temperatura. Para cada junção crítica, várias curvas de tempo de vida B_{10} são plotadas para diferentes períodos de ciclo (t_{cycle}), temperaturas absolutas e encapsulamento (T_j ou T_c).

Assim, o tempo de vida B_{10} das junções de solda conectando a parte interna (substrato) e a placa base em diferentes períodos de ciclos (t_{cycle}) e temperatura de encapsulamento (T_c) pode ser obtido através dos gráficos a seguir.

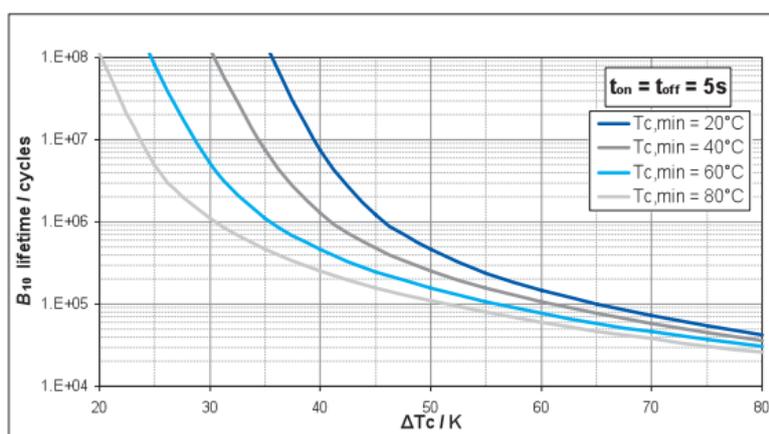


Figura 13 - Tempo de vida B_{10} para a junção de solda da placa de base: $t_{cycle} = 10s$.

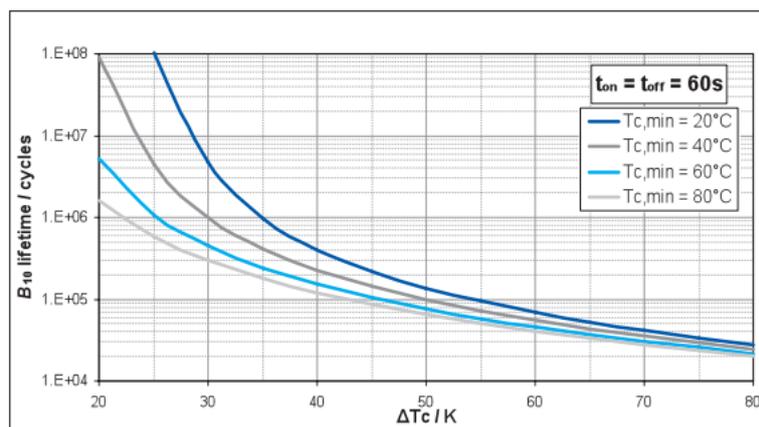


Figura 14 - Tempo de vida B_{10} para a junção de solda da placa de base: $t_{cycle} = 120s$.

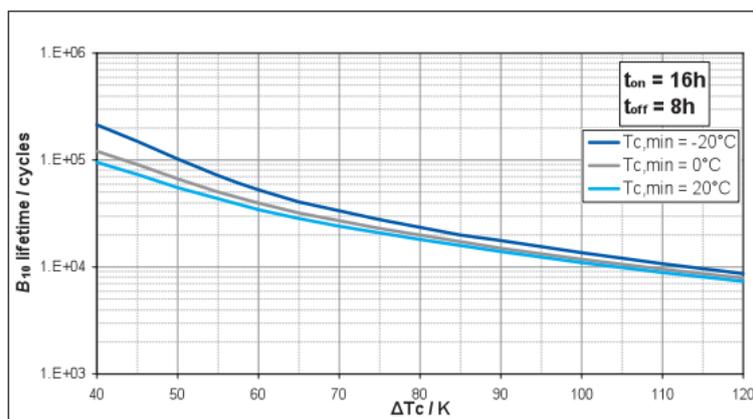


Figura 15 - Tempo de vida B_{10} para a junção de solda da placa de base: $t_{cycle} = 24\text{h}$.

Fonte: [70]

Com o intuito de otimizar a performance do tempo de vida nos fios das ligações, a nova geração dos módulos de *HipPak* sofreram algumas alterações em sua camada *epoxy* [70].

Capítulo 4 – A Confiabilidade e a Redundância do Sistema

4.1 Aspectos Gerais

Os sistemas de eletrônica de potência desempenham um papel cada vez mais importante em acionamentos de velocidade variável, correção de qualidade de energia, interfaces aos usuários de fontes de energia renovável, sistemas de armazenamento de energia e veículos elétricos ou híbridos elétricos. As técnicas de eletrônica de potência fornecem soluções compactas e de alta eficiência para conversão de energia. No entanto, a introdução dessas técnicas nestes campos de aplicação tem desafiado a confiabilidade em todos os sistemas citados. Uma das preocupações relacionadas à confiabilidade reside nos dispositivos semicondutores de potência e capacitores eletrolíticos, os quais são as partes mais vulneráveis. A maioria dos conversores não está equipada com redundância. Assim, qualquer falha que ocorra nos componentes ou nos subsistemas levará ao desligamento do sistema. Essas interrupções não programadas, não apenas lançam preocupações de segurança significativas, mas também aumentam o custo de operação do sistema e contrapõem parcialmente os benefícios da inserção da eletrônica de potência. Por exemplo, em veículos elétricos, falhas no sistema de propulsão elétrica prejudicarão a economia de combustível e prolongarão o período de recuperação de custos [71]. Para um sistema de geração fotovoltaica, o custo da falha é igual ao valor da energia não gerada enquanto o sistema estivesse fora, somado ao custo de reparo e substituição de peças [5].

Nas últimas décadas, muita atenção foi direcionada à confiabilidade de sistemas de eletrônica de potência. Em [72], [73], [74], várias métricas de avaliação da confiabilidade são definidas e analisadas. Para analisar a confiabilidade dos sistemas eletrônicos de potência, é necessária uma estimativa matemática, modelos de falhas em nível de componente são estudados extensivamente em [75],[76], [77], [78] e várias metodologias quantitativas são apresentadas para construir modelos de confiabilidade em nível de sistema, os quais combinam-se para dar uma previsão mais assertiva de confiabilidade [79], [80]. Alguns casos, o projeto clássico não consegue atender aos requisitos de confiabilidade das especificações. Inúmeras soluções são propostas para melhorá-la. O

monitoramento *online* ativo, o gerenciamento de falhas e a extensão da operação tolerante a falhas por meio da reconfiguração de estratégias de controle estão entre os métodos comumente adotados para aumentar a confiabilidade [81].

Considerando que o projeto com redundância é uma solução eficaz para manter a operação pós-falta e, assim, reduzir o número de paradas inesperadas dos sistemas, várias topologias de conversores de potência equipados com capacidade redundante são propostas em [32], [82], [83], [84].

4.2 Métricas de Previsão de Confiabilidade

A primeira etapa para avaliar e melhorar a confiabilidade do sistema é determinar quais métricas analisar. Como as métricas sempre refletem os objetivos do projeto, todas as informações utilizadas para determiná-las devem ser baseadas nos requisitos do cliente/usuário e na consideração cuidadosa das aplicações pretendidas. As métricas comumente adotadas para avaliação de sistemas de eletrônica de potência abrangem confiabilidade, taxa de falha, tempo médio de falha, tempo médio de reparo e disponibilidade.

I. Confiabilidade

Confiabilidade é definida como a probabilidade de que um item (componente, sistema ou subsistema) execute as funções necessárias por um período de tempo pretendido sob determinadas condições ambientais e operacionais [5]. A função confiabilidade $R(t)$ representa a probabilidade de o sistema operar sem falhas em um intervalo de tempo $[0, t]$, ou seja, a confiabilidade de um sistema, depende sempre do tempo considerado e normalmente diminui conforme o tempo avança. De maneira geral, para produtos comerciais, esse tempo deve cobrir o tempo de garantia.

II. Taxa de Falha

A taxa de falha de um item é uma indicação da “tendência para falha” do item após o tempo t ter decorrido. No capítulo anterior, na Figura 10 foi mostrada uma figura típica da taxa de falha em função do tempo. Portanto, a taxa de falhas no tempo útil é importante

para realizar análises de confiabilidade. A taxa de falha $\lambda(t)$ está relacionada à função confiabilidade $R(t)$ pela equação (4) a seguir.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t) \cdot \Delta t} = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (4)$$

Onde Δt é um intervalo de tempo com $\Delta t > 0$. A confiabilidade $R(t)$ é determinada a partir da taxa de falha $\lambda(t)$ com a consideração $R(0) = 1$, ou seja, o item está totalmente funcional no estado inicial.

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (5)$$

Em muitos modelos de confiabilidade, as taxas de falhas de componentes e subsistemas são assumidas de forma independente do tempo, embora essa premissa tenha limitações [73], [85].

III. Tempo Médio de Falha

Este, MTTF, é o tempo esperado antes que ocorra uma falha. Ao contrário da confiabilidade, ele não depende de um determinado período de tempo. Fornece o tempo médio em que um item opera sem falhar, sendo então uma métrica de desempenho amplamente citada na literatura para comparação de vários projetos de sistema. Este indicador reflete a distribuição de vida útil de um componente. A relação entre o tempo médio de falha e a confiabilidade é descrita pela equação (6) abaixo.

$$MTTF = \int_0^{+\infty} R(t) dt \quad (6)$$

IV. Tempo Médio de Reparo

O tempo médio de reparo, MTTR, é o tempo médio necessário para eliminar uma falha e restaurar o sistema a um estado especificado. O tempo de reparo depende da capacidade de manutenção, como diagnóstico eficaz de falhas, componentes substituíveis

disponíveis, ou seja, um almoxarifado adequado com sobressalentes a disposição e assim por diante.

V. Disponibilidade e Disponibilidade Média

A disponibilidade é a probabilidade de um sistema estar funcionando em um determinado momento. A disponibilidade média denota a porção média do tempo em que o sistema está operando em determinado período de tempo. Para um sistema reparável, se for reparado para uma condição “como novo”, toda vez que falhar, a disponibilidade média é dada pela equação (7) a seguir.

$$A_{Média} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (7)$$

Portanto, a melhoria da disponibilidade envolve o aumento do MTTF e a diminuição do MTTR. A principal limitação associada à métrica de disponibilidade média reside no fato de não poder refletir a frequência de falhas ou manutenções necessárias. Portanto, ela só é utilizada para avaliar os sistemas reparáveis onde a principal preocupação é a disponibilidade, e não a confiabilidade.

Estes conceitos, os quais serão aplicados nesta dissertação, serão detalhados e simplificados mais adiante juntamente com os estudos de casos.

4.3 Avaliação da Confiabilidade em Sistemas de Eletrônica de Potência

A avaliação da confiabilidade é importante para o projeto e o gerenciamento da operação dos sistemas. A avaliação quantitativa da confiabilidade de conversores eletrônicos de potência é essencial para determinar se um determinado projeto atende a certas especificações. É também de grande serventia como critério para comparar diferentes topologias, estratégias de controle e componentes. Além disso, a previsão precisa de confiabilidade fornece uma orientação valiosa para o gerenciamento da

operação e manutenção do sistema. Toda essa análise envolve algumas formas de modelos, as quais estão no nível de componente ou de sistema.

I. Modelos de Confiabilidade em Nível de Componentes

Para sistemas de eletrônica de potência, a pesquisa de confiabilidade no nível de componentes tem se concentrado principalmente em modelos de taxa de falhas para os principais componentes em circuitos de potência como semicondutores, capacitores e dispositivos magnéticos [7], [71], [74], [79], [15]. Experiências de campo demonstram que capacitores eletrolíticos e dispositivos de comutação de energia como IGBT e MOSFET são os componentes mais vulneráveis. Os componentes magnéticos são mais confiáveis e apresentam taxas de falhas mais de uma ordem de magnitude menores do que as de outros dispositivos de energia [5], [86]. Existem vários modelos de confiabilidade disponíveis para esses componentes eletrônicos. Modelos com base empírica, que normalmente dependem de dados de falha observados para quantificar variáveis de modelo, são mais amplamente empregados para analisar a confiabilidade dos componentes. A premissa é que os dados válidos das taxas de falha estejam prontamente disponíveis em aplicações de campo ou em testes de laboratório.

Destes modelos de confiabilidade com base empírica, o manual militar para a previsão da confiabilidade de equipamentos eletrônicos (Military-Handbook-217) é bem conhecido e amplamente aceito em aplicações militares e industriais [75]. MIL-217 fornece um banco de dados extenso para diversos tipos diferentes de peças. O objetivo é fornecer um banco de dados uniforme para previsão de confiabilidade sem experiência substancial de confiabilidade de um dado componente. No entanto, este manual de confiabilidade é criticado por conter algumas limitações [87]. Uma das limitações é que os modelos no MIL-217 assumem uma taxa de falha constante ao longo de sua vida [72]. Outra grande limitação é que os resultados de confiabilidade derivados desses modelos são frequentemente pessimistas e causam um projeto conservador, mais caro. Além disso, o MIL-217 não contém dados para determinar a influência dos modos inativos nos componentes, nem contém os dados que refletem os efeitos dos ciclos térmicos, que são todos de importância significativa para a aplicação prática da eletrônica de potência.

II. Modelos de Confiabilidade em Nível de Sistema ou Subsistema para Sistemas Tolerantes ou Não Tolerantes a Falhas

Um modelo de confiabilidade em nível de sistema apresenta uma forma clara das interdependências funcionais e fornece uma estrutura para desenvolver estimativas de confiabilidade quantitativa de sistemas para orientar o processo de compensação de projeto. Diversas metodologias para quantificar as métricas de confiabilidade de conversores de eletrônica de potência foram introduzidas. Elas podem ser categorizadas em três tipos de modelos de confiabilidade: métodos de contagem de partes, modelos combinatórios e modelos de espaço de estado.

a. Modelos de Contagem de Peças

- Quaisquer falhas que ocorram em cada um dos componentes ou subsistemas farão com que o sistema geral falhe;
- No nível dos componentes, as taxas de falhas de componentes individuais são consideradas constantes durante todo tempo de vida útil;
- O sistema é tratado como uma estrutura em série de todos os componentes ou subsistemas. Para uma estrutura em série com n subsistemas, conforme mostrado na Figura 16, o i -ésimo subsistema tem taxa de falha λ_i ; a taxa de falha λ do sistema geral é determinada pela equação (8) a seguir.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (8)$$

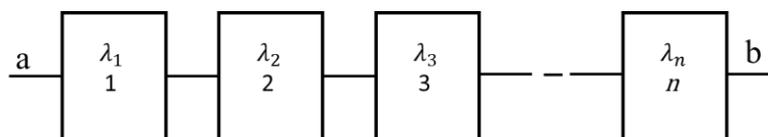


Figura 16 - Ilustração de uma Configuração em série de n Subsistemas.

A principal vantagem do método de contagem reside na sua simplicidade. Um modelo de contagem de peças pode fornecer uma estimativa de confiabilidade adequada para sistemas pequenos, e é também uma abordagem eficaz para comparação de confiabilidade entre diferentes arquiteturas de sistemas de eletrônica de potência no início do projeto. No entanto, para os sistemas que podem tolerar algumas falhas ou que podem ser reparados, a abordagem leva a resultados excessivamente conservadores. Para conversores de eletrônica de potência que não são equipados com capacidade de tolerância a falhas, este método de contagem de peças é frequentemente adotado [7], [71], [87], [74]. Por exemplo, o método de contagem de partes em [74] é empregado para estimar a confiabilidade de um conversor do tipo fonte de tensão para veículos elétricos, como mostrado na Figura 17. Qualquer falha de capacitor, IGBT e diodos levará o sistema a falhar. O MTTF do inversor é estimado com base neste modelo da equação a seguir.

$$MTTF = \frac{1}{\lambda(t)} = \frac{1}{\lambda_C + 6\lambda_T + 6\lambda_D} \quad (9)$$

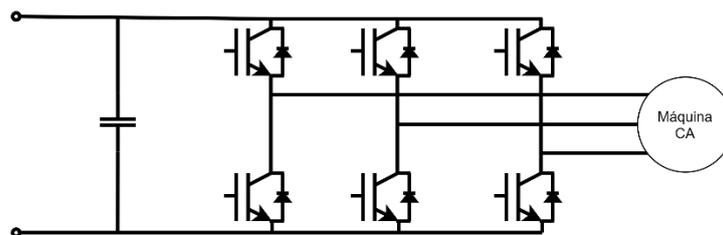


Figura 17 - Esquema Típico de Conversor Fonte de Tensão Trifásico para Veículos Elétricos.

Onde λ_C , λ_T e λ_D são as taxas de falha do capacitor, do IGBT e do diodo, respectivamente.

b. Modelos Combinatórios

Os modelos combinatórios são extensões dos modelos de contagem de peças e incluem árvores de falhas, árvores de sucesso e diagramas de blocos de confiabilidade de sistemas redundantes simples com cobertura perfeita. A árvore de falhas foi usada para analisar a confiabilidade dos sistemas de acionamento elétrico, conforme ilustrado na Figura 18 [80].

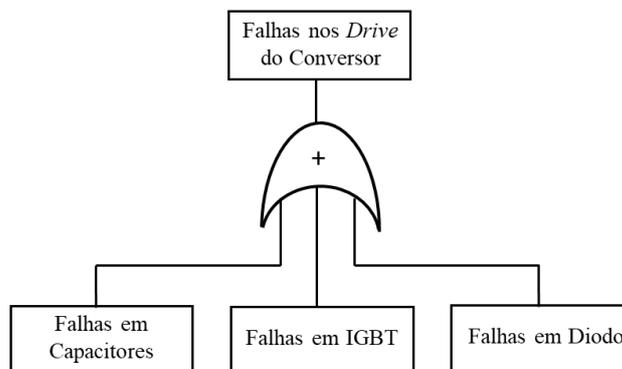


Figura 18 - Árvore de Falha Típica do Conversor Fonte de Tensão Trifásico para Veículos Elétricos.

Infelizmente os modelos combinatórios não podem refletir os detalhes que correspondem às configurações do sistema tolerantes a falhas, como processo de reparo, cobertura imperfeita, taxas de falha dependentes do estado, ordem das falhas de componentes e reconfiguração.

c. Modelo de Markov

O modelo de Markov é baseado na representação gráfica dos estados do sistema que correspondem às configurações do sistema, que são alcançadas após uma sequência única de falhas de componentes e transições entre esses estados. O sistema é considerado em estado livre de falhas quando todos os componentes não apresentam falhas. O sistema pode evoluir do estado livre de falhas para outros estados quando ocorrem falhas nos componentes. Existem dois tipos de estados nos modelos de Markov: 1) estados de absorção associados a configurações de sistema com falha; e 2) estados de não absorção, que correspondem a configurações nas quais o sistema pode fornecer funcionalidades completas ou parciais.

O modelo de confiabilidade de Markov é usado para analisar um conversor *boost* intercalado bifásico para aplicação fotovoltaica [79]. Este sistema, tolerante a falhas, pode operar com fases reduzidas e banco de capacitores de saída “esgotado”. Cada fase é dividida em dois subsistemas: unidade de entrada consistindo em diodo, chave e indutor e unidade de saída incluindo o capacitor de saída. Somente quando todas as unidades de entrada, unidades de saída ou ambas em duas fases estão com falha, todo sistema falhará. Uma vez que as taxas de falha dos indutores são muito mais baixas do que aquelas de semicondutores e capacitores eletrolíticos, suas falhas não são consideradas. Presume-se

que o sistema não pode ser reparado e que o controlador é capaz de detecção de falhas, isolamento e reconfiguração, ou seja, o sistema de cobertura perfeita. O diagrama de blocos funcional, esquemático do conversor e o diagrama do de transição de estado são mostrados nas Figura 19 e Figura 20.

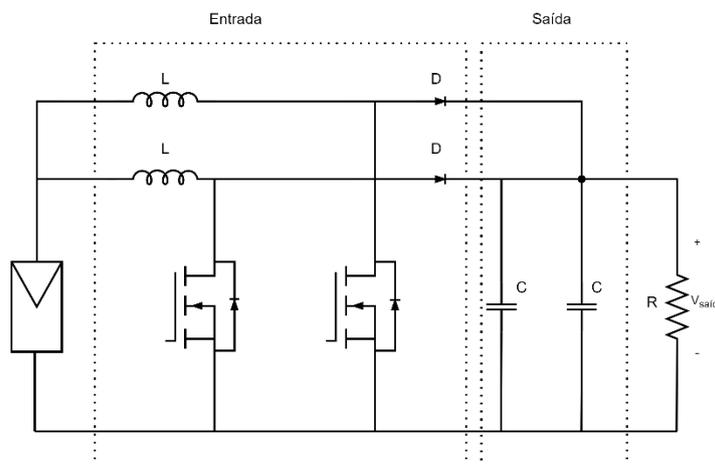


Figura 19 - Esquema do Conversor *Boost* Bifásico.

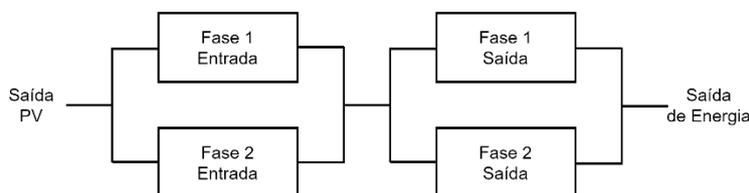


Figura 20 - Diagrama de Blocos Funcional.

Uma vez a confiabilidade $R(t)$ é obtida, o MTTF pode ser facilmente estimado com base na equação (6). A cadeia de Markov é uma abordagem bastante eficaz para quantificar a confiabilidade de sistemas tolerantes a falhas [80], Essa abordagem pode abranger muitos recursos de sistemas tolerantes a falhas, como sequência de falhas, cobertura de falhas e taxa de falhas dependentes do estado. Pode-se estimar diferentes métricas de confiabilidade do modelo de Markov, como MTTF, confiabilidade, disponibilidade, e assim por diante.

Existem algumas limitações associadas ao modelo de Markov. Uma propriedade importante do processo de Markov é que a probabilidade de transição de um estado para o outro não depende dos estados anteriores, mas apenas do estado atual. Consequentemente, o modelo de Markov não pode ser usado para avaliar a confiabilidade

do sistema quando os componentes têm taxas de falhas variáveis no tempo. Outra deficiência é que o espaço de estados cresce exponencialmente com o número de componentes. Para sistemas de maior porte, é difícil gerar o modelo de Markov a partir da descrição funcional do sistema e da análise de falha de componentes. O desafio de aplicar estes modelos a sistemas cada vez mais complicados pode ser claramente apreciado em um conversor multinível de alta potência que pode ter centenas de componentes e subsequentes transições de modo de falha. Em uma usina de geração fotovoltaica centralizada, muitos sistemas conversores individuais fornecem energia para cargas em conjunto e interagem entre si. É difícil ou trabalhoso construir modelos de confiabilidade para esses sistemas grandes e complexos. A fim de resolver eficazmente essa dificuldade, propõe-se decompor um grande sistema em vários subsistemas. Em seguida, um desses modelos de confiabilidade ou sua combinação é utilizada para analisar a confiabilidade de cada subsistema e do sistema geral. A decomposição de um grande sistema depende do sistema específico e dos modos de falha dos componentes. O conversor fotovoltaico para geração é decomposto em banco de capacitores de armazenamento, dispositivos semicondutores de potência e subsistemas de resfriamento, com base em modelos de taxa de falha semelhantes [5]. Em [80], um sistema de acionamento motorizado é dividido em três blocos funcionais: estatores, mancal e acionamento elétrico. Uma decomposição adicional pode ser realizada para subsistemas a fim de simplificar a análise.

4.4 O projeto com Redundância e a Operação Tolerante a Falhas

A operação tolerante a falhas significa uma falha em um componente ou subsistema não causa o mau funcionamento do sistema geral [88]. A característica de tolerância a falhas evita que o sistema sofra perdas significativas ou interrupções inesperadas e melhora a disponibilidade. A pesquisa em tolerância a falhas envolve quatro aspectos diferentes: Redundância, diagnóstico de falhas, isolamento de falhas e reparo *online*. A redundância pode ser realizada nos sistemas ou componentes extras.

I. Necessidade de Tolerância a Falhas

Embora a confiabilidade, como MTTF ou Disponibilidade, possam ser aprimoradas por muitas soluções e as taxas de falha possam ser minimizadas ao mais baixo possível, a falha é inevitável durante o tempo de vida dos sistemas. Em algumas aplicações críticas, o mau funcionamento é inaceitável ou causa sérias perdas. Portanto, a tolerância a falhas é necessária em muitos sistemas de eletrônica de potência. Para acionamentos elétricos utilizados em veículos elétricos e híbridos, as falhas podem ser críticas, uma vez que um torque de saída descontrolado pode ter um impacto adverso na estabilidade do veículo, o que pode, em última análise, colocar em risco a segurança dos passageiros. Consequentemente, uma função *limping-home* é desejável [89]. Em aplicações de alta potência, como motores de bombas de indústria petroquímica, para ventiladores na indústria de cimento, para bombas em estações de bombeamento de água e para laminadores de aço na indústria de metal, compensação de potência reativa e interface de rede de recursos de energia renovável, uma paralisação inesperada causaria uma perda significativa de produção [32].

De acordo com o desempenho da operação pós-falha, existem dois tipos de operação tolerante a falhas: Operação degradada e a operação *quasi-normal*, que diferem em termos de custo, desempenho e viabilidade do sistema.

a. Operação Degradada

A operação degradada sob condições pós-falha denota que os sistemas podem tolerar falhas e continuar a executar algumas funções principais com potência e tensão de saída reduzidas, piora na qualidade da energia ou outras métricas de desempenho abaixo do ideal. Geralmente, a operação degradada é realizada pela reconfiguração de estratégias de controle para explorar a capacidade redundante inerente dos conversores com nenhum ou poucos dispositivos adicionais.

Esta forma de operação, em conversores multinível e conversores de fonte de tensão trifásicos é investigada extensivamente na literatura. A operação degradada foi estudada para conversor ponte-*H* multinível em cascata com modulação vetorial espacial aplicada aos *drives* do motor ilustrado na Figura 21 [90], [91]. Em [90], as células do conversor com falha são isoladas do sistema, e estados de chaveamento redundantes são usados para gerar uma alteração na tensão de neutro. Assim, resultam em uma tensão de saída de fase balanceada e uma distorção harmônica. Em comparação com a operação

normal, a magnitude da tensão de saída diminui e a distorção harmônica aumenta. Devido ao desequilíbrio, o ponto de neutro de uma carga não pode ser conectado diretamente ao ponto de neutro de uma saída do conversor. A principal diferença da estratégia de controle proposta em [91] é que as células em falha também participam da operação e contribuem com dois níveis de tensão de saída dependentes de chaves específicas com falha.

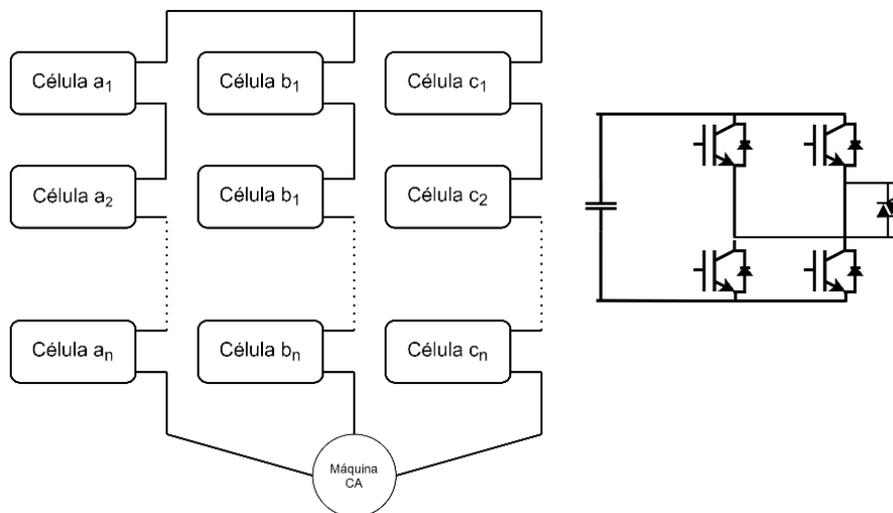


Figura 21 - Conversor Ponte-H Multinível em Cascata Aplicada aos *drivers* motor.

Semelhante ao conversor da Figura 21, a operação degradada de conversores com fixação de ponto de neutro (NPC) é realizada pelo uso de estados de chaveamentos redundantes [82], [83], [84], [92]. A Figura 22 mostra um conversor NPC trifásico convencional. Em [49], é apresentado um esquema de controle para manter a operação contínua do conversor de três níveis para um sistema de armazenamento de energia utilizando a redundância de vetores de tensão.

Sem a necessidade de dispositivos de energia extras, este método cobre uma única falha de curto-circuito de chaves ou diodos de fixação. No entanto, as chaves devem suportar a tensão total do elo de corrente contínua. Portanto, é necessário superestimar essas opções.

A solução mostrada na Figura 23 (a) são estudadas em [83], [84], [92]. Três pares de tiristores são adicionados à estrutura do conversor NPC convencional para fornecer tensões de saída trifásicas balanceadas para falhas em curto-circuito ou circuito aberto em chaves ou diodos. Em condições normais, os retificadores estão no estado desligado.

Quando S_{a2} ou S_{a3} não ligam, os retificadores são ativados para conectar a carga ao ponto de neutro e, assim, manter a operação contínua.

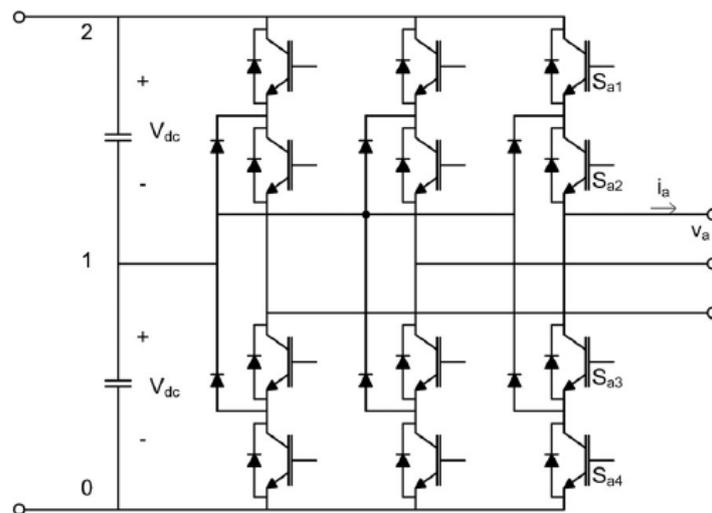


Figura 22 - Esquema de Conversor Convencional com Ponto de Neutro Grampeado.

Adaptado de [93]

Já Figura 23 (b) apresenta o mesmo esquema de controle com o método anterior para realizar a operação a operação degradada de conversores NPC [94]. A vantagem dessas duas soluções é que não é necessário superdimensionar as classificações de tensão dos semicondutores de potência.

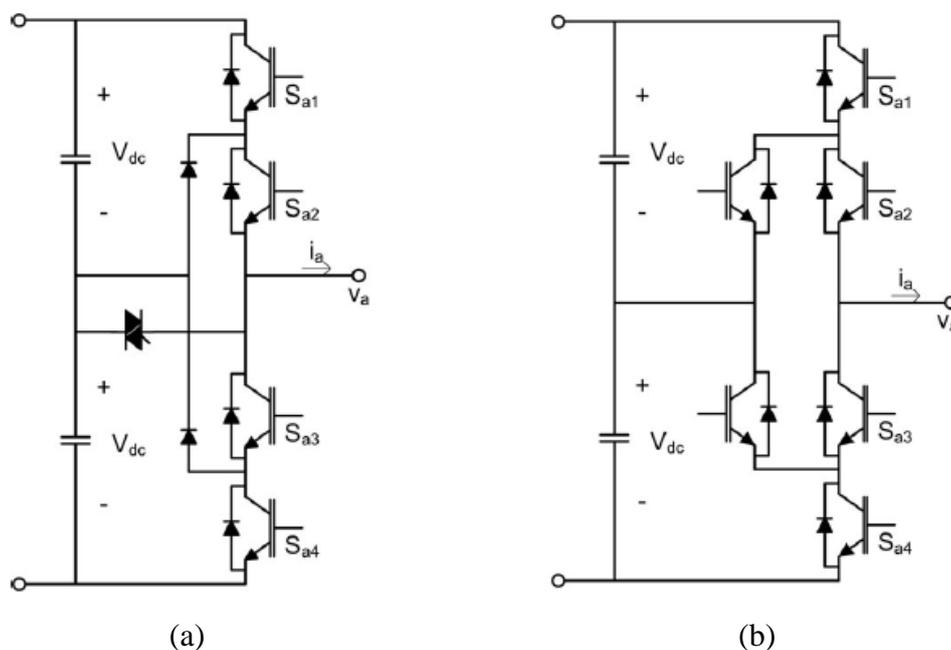


Figura 23 - Esquema de um Ramo de um uma Fase do Conversor com Ponto de Neutro Grampeado realizado Com Dois Projetos Tolerantes a Falhas Diferentes.

O comum a essas duas soluções é que o índice de modulação máximo é reduzido devido à perda de alguns estados de comutação críticos. Portanto, as magnitudes atingíveis de tensões de saída diminuem.

De maneira geral, a operação degradada de sistemas de eletrônica de potência pode ser realizada principalmente, usando redundâncias naturais dos sistemas. Uma vez que componentes adicionais mínimos são necessários, o resultado são soluções simples e de baixo custo. No entanto, existem algumas limitações significativas.

- A aplicação é de banda estreita. Por causa de desempenhos degradados, como tensão de saída reduzida, potência reduzida e distorção por harmônicos, todos comprometidos, somente é viável para aplicações que podem tolerar o desempenho degradado. Para algumas situações, este modo pode ser inaceitável. Por exemplo, em conversores de energia com tensão de saída reduzidas sob condições de falha não são adequados para aplicações de serviços públicos;
- Não é utilizada para conversores multinível devido ao fato de que eles têm estruturas complexas e, portanto, muitos estados de comutação redundantes em combinações;
- Componentes com falhas e alguns tipos de falhas que poderiam ser cobertos estão limitados.

b. Operação Pós-falha *Quase-Normal*

Por causa de muitas limitações que dependem da capacidade inerente de tolerância a falhas dos sistemas, o projeto redundante é estudado e relatado extensivamente para fornecer uma operação “quase normal” de conversores de energia em situações de falha.

Como exemplo, destacam-se os conversores multinível em cascata, que devido à alta modularidade, como mostrado na Figura 21, podem fornecer desempenhos aproximadamente semelhantes à operação normal por meio de um projeto redundante simples. Pesquisadores em [95] apresentam um controle tolerante a falhas para um compensador síncrono estático (STATCOM) baseado em um conversor em ponte-H em cascata. Durante o estado normal, os inversores operam com $N+1$ células conversoras em cascata em cada fase e $2N+3$ níveis de tensão de saída. Quando ocorre uma falha em uma chave, a célula com falha é ignorada e o número de níveis de tensão de saída diminui para

$2N+1$. Os ângulos de deslocamento de fase são regulados para gerar uma tensão de saída balanceada. Ao mesmo tempo, as tensões do *link* de corrente contínua dessas células nas fases com falta também precisam aumentar para manter as magnitudes de tensão inalteradas. O mesmo projeto redundante é proposto para uma aplicação de turbina eólica de acionamento direto [96]. A principal desvantagem está associada ao grande número de componentes utilizados por comutadores de *by-pass* e células conversores de *backup*. Dispositivos semicondutores de potência e capacitores de *link* de corrente contínua acabam por ser superdimensionados para suportar a tensão no *link*, que é elevada em situações de falha.

4.5 Mais Sobre Redundância

Em linhas gerais, fica subentendido que a redundância aumenta a disponibilidade de um sistema de energia em ordens de magnitudes. Assim, ao se considerar uma fonte de alimentação com um tempo médio até a falha (MTTF) de 500.000 horas. Dado que se trata de uma aplicação crítica, supõem-se que o tempo médio entre falhas (MTTR) seja de 4 horas, usando a Equação (7), a disponibilidade desta fonte de alimentação será de 0,99999200. Embora possa parecer um valor excelente, seja considerada então a indisponibilidade como $U = I - A$, o que resultará em $7,99993600 \times 10^{-6}$, equivalente a 252,5 segundos por ano.

Nesta seara, 4 minutos por ano pode parecer um número muito baixo, porém não é incomum o mercado atual ter um requisito de sistema com indisponibilidade de apenas milissegundos ou talvez microssegundos por ano. Por exemplo, para ter uma indisponibilidade de 10 milissegundos por ano com uma fonte de alimentação independente, dado um tempo médio de reparo de 4 horas, o tempo médio até a falha deverá ser de aproximadamente 13.000.000.000 de horas.

Claramente, alguma outra maneira de alcançar a baixa indisponibilidade do sistema é necessária, e, portanto, justifica-se o projeto de redundância.

Abarcando então o projeto de redundância a nível de sistema, supõem-se que em vez de uma fonte de alimentação, houvesse duas fontes, e que estivessem operando em paralelo e foram projetadas de forma que, se uma falhar, a outra continua operando sem causar mau funcionamento à carga. Portanto, a probabilidade de que o sistema esteja

funcionando é a probabilidade de que pelo menos uma fonte de alimentação esteja funcionando. Esta relação mencionada é conhecida para cálculos de probabilidades de um determinado número de sucessos em um determinado número de tentativas. Probabilidades desse tipo são calculadas usando a distribuição binomial. A probabilidade de pelo menos x em n tentativas, onde a probabilidade de sucesso em qualquer tentativa é p , é dada pela equação (10).

$$P(n, x, p) = \sum_{i=x}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (10)$$

Assim, está se considerando que os conversores $N + M$ estão conectados em paralelo. Supondo ainda que a probabilidade de qualquer conversor esteja operando seja dada pelo $A_{Médio}$ da equação (7) e com valor conforme início desta seção, ou seja, 0,99999200. Em seguida, a probabilidade de que pelo menos N conversores estejam operando, ou seja, o sistema geral está disponível, e esta probabilidade seja dada pela equação (11).

$$A_{sist} = P(N + M, N, A_{Médio}) = \sum_{i=N}^{N+M} \binom{N+M}{i} A_{Médio}^i (1 - A_{Médio})^{N+M-i} \quad (11)$$

Usando os mesmos valores hipotéticos, para de forma didática, aclarar, tem-se: MTTF = 500.000 horas, MTTR = 4 horas, a probabilidade de que pelo menos um conversor de energia de um total de dois, esteja operando, ou seja, a disponibilidade do sistema, é calculada pela equação (11) acima, alcançando um valor de 0,99999999936. Obtém-se um valor tão próximo da unidade que começa a perder significado. A indisponibilidade fornece uma informação muito mais clara do desempenho do sistema. No entanto, calcular a indisponibilidade subtraindo a disponibilidade da unidade, geraria resultados não confiáveis. Considerações sobre precisão numérica impedem resultados precisos na subtração de dois números que começam a diferir somente após vários dígitos significativos. Os resultados precisos para a indisponibilidade são mais bem obtidos calculando-a diretamente.

Neste caso acima, a principal questão é encontrar a probabilidade de que menos de N unidades estejam operando, o que também pode ser expresso como a probabilidade

de $M + 1$ unidades tenham falhado. Adequando para a forma de distribuição binomial, vem a equação (23), a seguir:

$$U_{sist} = P(N + M, M + 1, U) = \sum_{i=M+1}^{N+M} \binom{N+M}{i} U^i (1-U)^{M+N-i} \quad (12)$$

Para o caso redundante 1+1 considerado acima, $U_{sist} = P(2, 2, 252.5) = 2,02$ microssegundos por ano.

Ao adicionar uma fonte de alimentação redundante, a indisponibilidade, como já era de se esperar, é reduzida em cinco ordens de magnitude, demonstrando assim a grande vantagem da redundância.

Continuando essa breve abordagem didática, considera-se avaliar o efeito de M e de N sobre a disponibilidade em um sistema redundante 1+1 e 2+1. Em cada caso, ocorre um mal funcionamento do sistema se duas ($M+1$) unidades falharem. Em um sistema 1+1 só há uma maneira para isso ocorrer. Em um sistema 2+1, existem 3 combinações diferentes de unidades que permitem que duas delas falhem. Também existe a configuração com três unidades em falha. Com, pelo menos três vezes a oportunidade de ocorrer um mau funcionamento do sistema, na Tabela 3, a seguir, pode ser observada a indisponibilidade de um sistema 2+1, bem como 1+1 e também para sistemas não redundantes.

Tabela 3 - Disponibilidade e Indisponibilidade versus Configuração.

Configuração	Disponibilidade	Indisponibilidade (ms/ano)
Não Redundante	0,999992000000	252,5
1+1	0,999999999936	2,02
2+1	0,999999999808	6,06

Avaliando a tabela acima, não é surpreendente, dada a oportunidade adicional de mau funcionamento do sistema, que a indisponibilidade do sistema 2+1 seja três vezes maior do que o sistema redundante 1+1. A indisponibilidade calculada para sistemas com várias combinações de N e M serão mais bem exploradas no próximo capítulo.

Pode-se também estender a discussão de forma genérica com a escolha de N e M , e para tal, os requisitos de alta disponibilidade conduzem a escolha de N ao menor número

possível. Outros requisitos, no entanto, dependendo da aplicação, poderão levar a escolha de N a um valor maior. Em muitos sistemas, como servidores de rede, é muito importante minimizar o custo do sistema a nível de entrada. Para o sistema de energia, isso geralmente significa não incluir mais nenhum equipamento de conversão de energia do que o absolutamente necessário. Sistemas como esses são altamente escalonáveis tanto quanto se desejar.

Se um sistema de conversão de energia, por exemplo, foi configurado como um sistema não redundante, então mesmo que este sistema tenha a mínima potência de carga para operar, ele terá que fornecer toda a energia que o sistema precisa. Por outro lado, ao se considerar um sistema redundante a escolha do N pode não ser tão óbvia, tornando-se um problema de programação não linear complexo, envolvendo:

- Energia necessária para a configuração mínima do sistema;
- Energia necessária para a configuração máxima do sistema;
- Várias potências em diversos níveis de tensão de saída em função da configuração;
- *Breakpoints* em configurações de sistema que requerem aumento da capacidade do alimentador de entrada de corrente alternada;
- A combinação prevista de configurações a serem enviadas inicialmente;
- A combinação prevista de configurações do sistema após as atualizações em campo.

A criação de um sistema tolerante a falhas ou altamente disponível é alcançada pela adesão aos princípios apresentados neste capítulo. Embora os princípios sejam simples, a execução requer atenção aos detalhes. As considerações básicas aqui apresentadas puderam trazer a dimensão da importância sobre confiabilidade e disponibilidade, bem como a implementação de projetos com redundância. No próximo capítulo serão abordados estudos de caso em que serão apresentados casos/exemplos mais palpáveis e mensuráveis favorecendo o entendimento.

Capítulo 5 – Metodologia de Estudo

Com o intuito de estruturar o método de estudo neste trabalho, este capítulo busca compor a metodologia, com os passos desde o estudo bibliográfico até a construção do estudo de caso, contextualizando cada passo da dissertação.

Com o objetivo de comparar quantitativamente o método de distribuição de energia com os métodos convencionais em termos de confiabilidade e custo, o presente estudo focou-se em verificar modelos matemáticos para avaliar quantitativamente o custo de sistemas com conversores paralelos redundantes e, assim, suscitar uma estrutura para determinar N e X de modo a otimizar a confiabilidade e o custo do projeto. Ou seja, partir-se-á de um caso base para que, nele aplicando o método de distribuição de energia, através da comparação com o método convencional seja possível determinar a configuração do sistema de conversão de energia em um sistema de geração solar fotovoltaica. Em seguida, através da comparação entre esses dois métodos citados acima, quanto a confiabilidade e o custo, desenvolvem-se as análises para que então possa-se chegar a uma configuração, a mais interessante possível, para implementação de um sistema de conversores paralelos redundantes.

5.1 Quanto à Abordagem

De forma inicial foi necessário realizar uma busca aprofundada na literatura, com uma vasta revisão bibliográfica a fim de estudar e classificar algumas estratégias de conversores e suas particularidades, ressaltar algumas vantagens e limitações, bem como sua sustentação no avanço da tecnologia. Em seguida, discorrido sobre conversores estáticos e suas características básicas e alcançar o primeiro ponto mais importante desta parte inicial: o entendimento de seu comportamento quando associado em N módulos conectados em paralelo.

Parte muito importante desta fase inicial foi a breve passagem por referências bibliográficas que abordassem algumas estratégias de controle que sejam aplicadas a paralelismos de conversores, onde se pode destacar os tipos Mestre/Escravo, Central,

Distribuído e o método de *Droop*. Na Tabela 1 é possível verificar um quadro resumo destas estratégias com menção a algumas características como Grau de Redundância, Eficiência no Controle do Paralelismo, Grau de Complexidade do Controle, dentre alguns outros. O entendimento destas estratégias de controle fez-se necessário para que mais adiante fosse possível chegar método de controle utilizado neste estudo, o Controle com Distribuição Dinâmica de Energia. Com a utilização deste método, o sistema de controle pode operar em qualquer ponto, atuando de forma parcial e seletiva do total de conversores $N + X$ para atingir a eficiência operacional máxima conforme [11]. Agregando ainda, o atendimento a carga, de forma alternada com os módulos ociosos, quando o sistema não estiver em carga pesada, ressaltando dessa forma claramente o perfil técnico do sistema.

Ainda neste sentido, de muita valia para o estudo tem-se o entendimento no que tange a tolerância a falhas uma vez que um dos focos do trabalho é exatamente verificar a confiabilidade. Assim, fez-se necessário a busca por referências e o entendimento dos principais métodos de tolerância a falhas em conversores de potência, métodos como a verificação e classificação pelo nível das chaves, o nível de ramos, o nível de módulo e o nível de sistema.

A partir de então, o próximo passo foi uma análise no que tange a confiabilidade de conversores. Nesta seara é muito importante estudar e ter um bom domínio das definições a respeito das falhas nos módulos de potência, e com base nesta definição verificar possibilidades de avaliar com que frequência falha um determinado componente, e por conseguinte, com que frequência se executa a sua manutenção. Vale ressaltar algumas técnicas de diagnósticos e prognósticos, monitoramentos e formas de estimar a vida útil dos componentes de potência, conforme discorrido no texto.

Permanecendo na seara da confiabilidade, parte necessária no roteiro proposto neste estudo foi a busca pela redundância, onde a literatura, que é vasta, deu apoio ao enriquecimento das diversas formas possíveis e as implicações da redundância na confiabilidade. Nesta abordagem, foi importante metodologicamente entender a medição da confiabilidade, passando pelos níveis de modelos de confiabilidade para que então seja possível focar em como e quanto um determinado grau de redundância poderá contribuir na confiabilidade, para que então seja alcançado um projeto com redundância em nível de subsistemas e que seja tolerante a falhas.

Dessa forma, percebe-se que estes fatores vêm contribuir com a performance dos sistemas estudados, ou seja, de maneira geral melhorando sistemas de geração solar fotovoltaica, portanto, há que se verificar os custos, em todos os sentidos, envolvidos nesse projeto. Assim, foi necessário abordar a análise de custos e então buscar otimizá-los. Tratando-se de sistemas com conversores principais e redundantes em paralelo baseados nos casos estudados, sendo então detalhados os custos iniciais de aquisição e instalação, bem como os custos operacionais de O&M e não menos importante o custo de perda de energia. E então, com toda essa abordagem espera-se ser possível não somente criar uma metodologia para configuração ótima de conversores focados na confiabilidade e nos custos, mas também avaliar os impactos em modelo de custos de confiabilidade e então verificar a viabilidade de um determinado projeto.

5.2 Quanto aos Procedimentos

A fim de satisfazer os crescentes requisitos de confiabilidade para conversores de energia, como eólica ou solar, ou ainda quaisquer outras aplicações de conversores, com uma solução mais econômica, este capítulo apresenta como objetivo estabelecer critérios de confiabilidade *versus* custo correspondente para dispositivos de comutação.

Os conversores do tipo fonte de tensão têm sido cada vez mais utilizados como conexão de fontes de energia renováveis com o sistema de potência [14]. Para alcançar um nível expandido de potência e de redundância de sistema, a conexão de um conversor paralelo $N+X$ pode ser empregada conforme a Figura 24.

A potência dos N conversores paralelos estarão adequados a potência de pico da carga, e então os X conversores restantes serão utilizados como *backup* para consideração de redundância. Ao adicionar conversores redundantes, implicará diretamente na confiabilidade do sistema, aumentando-a significativamente. Além disso, ao ser implementado um sistema de alta potência com conversores conectados em paralelo, o custo de reparo e substituição de cada falha será reduzido [16]. E neste sentido, a confiabilidade do conversor requer uma atenção cada vez mais especial, considerando ainda que os sistemas de geração distribuída têm se tornado cada vez mais populares, fator que reforça a necessidade da confiabilidade [15], [5].

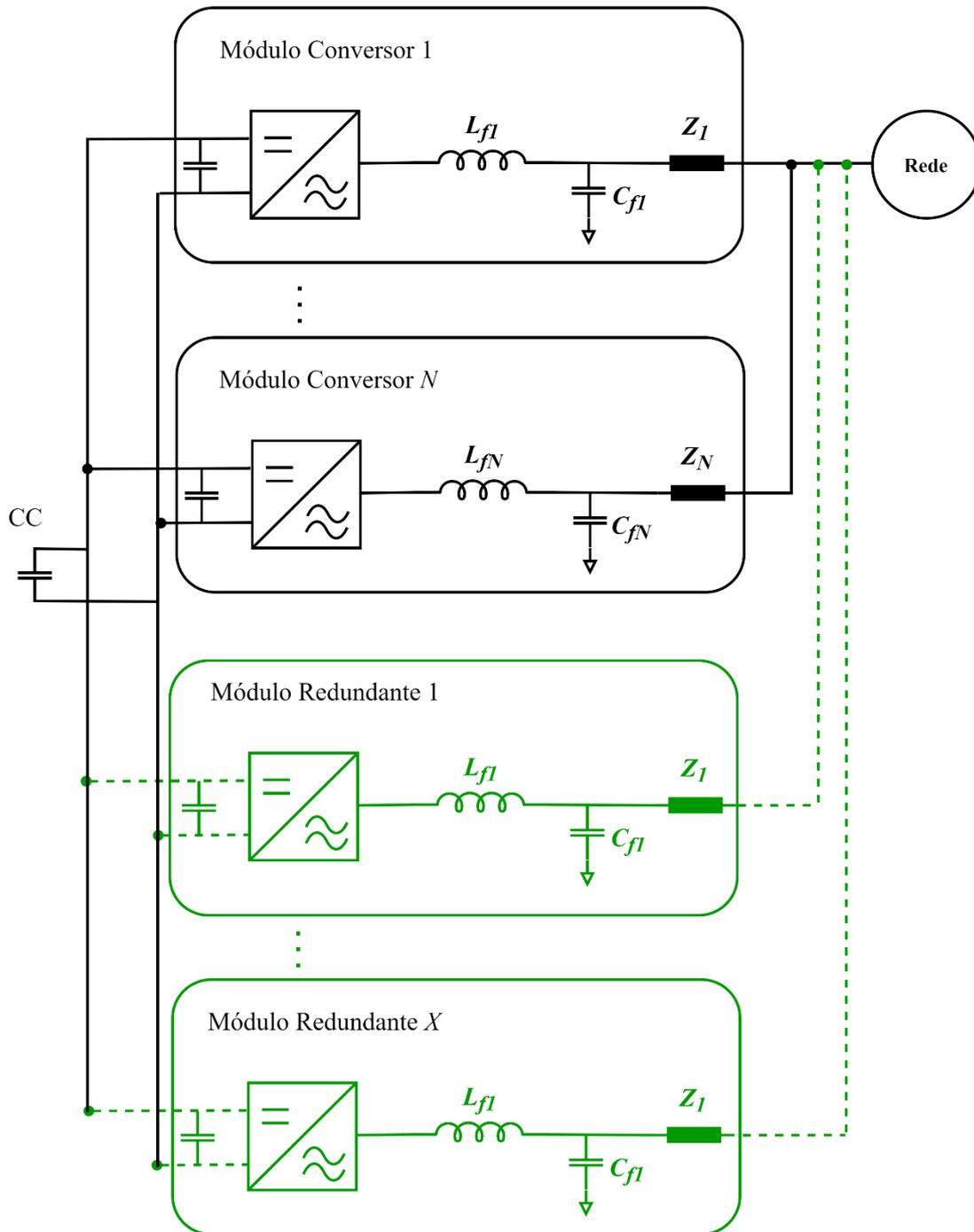


Figura 24 - Arquitetura do sistema de N conversores paralelos com X de redundância.

Tomando por base a situação explanada em [17], para um gerador fotovoltaico, o tempo médio entre falhas (MTBF) do módulo fotovoltaico foi aumentado para até 552

anos. Observe que isso não significa que o módulo poderá ter uma durabilidade de mais de 500 anos, e sim, que dados 552 módulos fotovoltaicos, pode-se esperar que 01 falhe em um determinado ano. No entanto, o MTBF do sistema do conversor é geralmente de 01 a 10 anos [97], [98]. Portanto, para aperfeiçoar a confiabilidade geral do sistema, otimizar a confiabilidade do sistema de conversão de energia torna-se fator determinante.

De acordo com [4], o preço de uma unidade de um conversor é aproximado como constante, ou seja, \$0,715/W. Assim, o custo de instalação será também aproximadamente constante independentemente de N . No entanto, não seria a melhor solução escolher N aleatoriamente, uma vez que está relacionado ao índice de confiabilidade do sistema. Confiabilidade esta que influenciará em seu custo operacional, incluindo custo de perdas de energia, custos de manutenção e reparo e custo de tempo de inatividade. Embora a confiabilidade do sistema seja aprimorada com a adição de mais conversores redundantes, o investimento extra também será inferido.

O estudo desta dissertação dedicou grande parte do tempo em uma revisão bibliográfica não só focado na teoria, mas também visando estudos com aplicações práticas em investidas de sistemas cada vez mais confiáveis através da redundância com conversores adicionais em paralelo. Desse modo, este estudo mostrou que, quando o número X de conversores redundantes aumenta para um determinado valor, a confiabilidade do sistema não performa tanto quanto se deseja [5], [6], [7]. Embora seja informativa, esta análise qualitativa não fornece uma solução sobre como determinar X , por exemplo, em um sistema de geração distribuída para obter confiabilidade máxima e custo mínimo.

Nesta dissertação, em especial neste capítulo, foram auferidos modelos matemáticos, os quais serão explanados mais adiante, a fim de avaliar quantitativamente a confiabilidade e o custo de sistemas de conversores paralelos redundantes. Uma estrutura para determinar N e X otimizando o custo e a confiabilidade do sistema também será analisada.

Tratando-se do controle, diversas estratégias de controle têm sido propostas para otimizar o equilíbrio de potência entre os conversores conectados em paralelo, conforme já visto nos capítulos anteriores. Em um sistema com conversor em paralelo convencional, todos os módulos compartilham igualmente a corrente de carga e a eficiência de carga leve do sistema é baixa. Em [11], pesquisadores propuseram um

esquema de distribuição dinâmica de energia para reduzir o número de conversores em operação sob carga leve e programar a rotina entre os módulos em paralelo em um modo de compartilhamento de tempo. Assim, quando comparado a um esquema de controle de compartilhamento de carga média convencional, o esquema de distribuição dinâmica de energia melhora a eficiência na carga leve do sistema e o tempo médio de operação do conversor entre falhas mostram-se mais interessantes.

Neste estudo, será comparado quantitativamente este esquema de distribuição dinâmica de energia com o modo convencional no que tange a confiabilidade e custos. Nas seções seguintes serão apresentados os passos desta análise.

5.3 Quanto à Confiabilidade da Operação com Conversor

Ao se examinar a avaliação da confiabilidade de um conversor do tipo fonte de tensão completo, primeiramente é importante apresentar algumas terminologias básicas com definições relacionadas à avaliação confiabilidade [99], [100].

- i. Taxa de falha λ é a frequência com que um componente falha. A maioria dos componentes de engenharia, particularmente dispositivos semicondutores, seguem a curva de taxa de falha em forma de banheira, a conhecida “curva da banheira”, conforme Figura 10 de maneira generalista, e abaixo, a Figura 25 (a) de maneira mais aplicada neste capítulo.

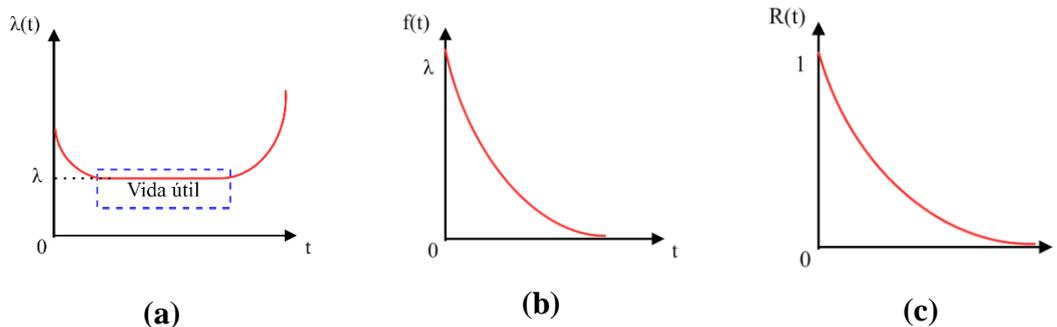


Figura 25 - Índices de confiabilidade do sistema distribuído exponencial: (a) Taxa de falha, (b) função de densidade de potência e (c) função de confiabilidade.

A taxa de falha varia ao longo do ciclo de vida de um sistema. No entanto, durante a maior parte do tempo a taxa de falha do sistema se mantém constante. Dessa forma, pode-se aproximar o sistema por distribuição exponencial com taxa de falha λ [75]. O padrão IEEE 1240 assumiu a mesma premissa e avaliou a confiabilidade das estações conversoras HVDC com distribuição exponencial. A taxa de falha em condições operacionais é diferente da taxa de falha básica para equipamentos elétricos e eletrônicos, e é afetada por vários fatores, como tensão de operação, corrente e temperatura [101].

$$\lambda = \lambda_{ref} \times \pi_U \times \pi_I \times \pi_T \quad (13)$$

Onde:

λ_{ref} : taxa de falhas nas condições de referência;

π_U : fator de dependência de tensão;

π_I : fator de dependência de corrente;

π_T : fator de dependência de temperatura.

- ii. Taxa de Reparo μ é a frequência com que um componente é reparado. Para distribuição exponencial, a taxa de reparo também é constante.
- iii. A função de densidade de probabilidade $f(t)$ fornece a probabilidade de que um componente falhe no tempo t . A Figura 25 (b) mostra a função de densidade de probabilidade de distribuição exponencial de terminada pela seguinte fórmula:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (14)$$

- iv. A função de confiabilidade (ou, a grosso modo sobrevivência) $R(t)$ calcula a probabilidade de que um componente (sobreviva) tenha uma vida útil além do tempo t . Conforme mostrado na Figura 25 (c), a

confiabilidade do sistema diminui exponencialmente à medida que o tempo aumenta.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (15)$$

- v. O tempo médio até a falha (MTTF) é o tempo médio de atividade de um sistema. Para distribuição exponencial:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (16)$$

- vi. Tempo médio de reparo (MTTR), que é o tempo médio que o sistema está em condição de reparo, é o tempo médio de inatividade de um sistema. Para distribuição exponencial:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (17)$$

- vii. MTBF é o tempo de ciclo médio do sistema.

$$MTBF = MTTF + MTTR = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\mu} \quad (18)$$

Para um sistema com taxa de reparo muito maior do que a taxa de falha, MTBF pode ser aproximado para o MTTF ($\mu \gg \lambda$) \Rightarrow ($1/\mu \ll 1/\lambda$) :

$$MTBF \approx MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

- viii. Disponibilidade A refere-se à probabilidade de o sistema ser encontrado em estados úteis (disponíveis para operar).

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (20)$$

- ix. A indisponibilidade U é a probabilidade de o sistema ser encontrado em estados inativos (indisponíveis para operar).

$$U = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (21)$$

5.4. Quanto à Análise da Confiabilidade do Sistema

A partir da Figura 26 pode ser observada estrutura detalhada de um sistema de conversor monofásico, que inclui IGBTs, diodos amortecedores, *drives*, sensores de tensão e corrente, capacitores do elo CC, disjuntor, sistema de resfriamento e um filtro de saída. Para avaliar a confiabilidade deste sistema, são necessários os dados de taxa de falha e taxa de reparo de cada componente. Para semicondutores de potência e sistemas de conversores, os parâmetros de confiabilidade não são uniformes para diferentes classificações de potência e fabricantes.

Neste trabalho, as taxas de falha dos componentes listados na

Tabela 4 vêm das seguintes fontes: o manual militar [102], lançado em 1995, o Padrão IEC 61709 publicado em 1994 [103] e os dados de campo fornecidos em [104] e [105].

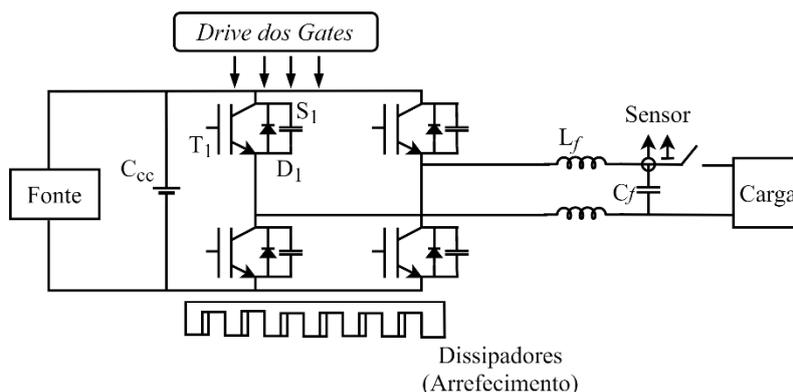


Figura 26 - Conversor IGBT monofásico com filtro de saída.

O modo de entendimento da física da falha foi proposto como um método de previsão de confiabilidade mais preciso em [106], [107], [108]. No entanto, todos os possíveis mecanismos de falha dos componentes da fonte de tensão do conversor não foram identificados. Portanto, os dados para um sistema completo de conversor fonte de tensão não estão disponíveis. A taxa de falha de todo o hardware é calculada como [108]:

$$\lambda_{tot} = \lambda_1 + 4 \times (\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_{11}) + 2 \times \lambda_5 + \sum_{i=6}^{10} \lambda_i = 0,18/ano \quad (22)$$

Tabela 4 - Taxa de Falha de Cada Componente de um Sistema Prático Monofásico (230 V; 5 kW).

Componentes do Sistema Conversor	Taxa de Falha (por milhão de horas)	Taxa de Falha (por ano)
Capacitor elo CC - C_{dc}	$\lambda_1 = 3,03$	$\lambda_1 = 0,0266$
IGBT - T_1	$\lambda_2 = 0,9$	$\lambda_2 = 0,0079$
Diodo - D_1	$\lambda_3 = 0,8$	$\lambda_3 = 0,00702$
<i>Snubber</i> - S_1	$\lambda_4 = 0,001$	$\lambda_4 = 0,00000877$
Filtro Passivo Indutivo - L_f	$\lambda_5 = 0,038$	$\lambda_5 = 0,0003334$
Filtro Passivo Capacitivo - C_f	$\lambda_6 = 0,87$	$\lambda_6 = 0,00763$
Sensor de Tensão	$\lambda_7 = 0,56$	$\lambda_7 = 0,00491$
Sensor de Corrente	$\lambda_8 = 0,5$	$\lambda_8 = 0,004387$
Disjuntor (CB)	$\lambda_9 = 3,3$	$\lambda_9 = 0,02896$
Sistema de Arrefecimento	$\lambda_{10} = 1,36$	$\lambda_{10} = 0,01193$
<i>Gate Drive</i>	$\lambda_{11} = 1,0$	$\lambda_{11} = 0,0087744$

Para este estudo, a taxa de reparo do sistema conversor é definida com dados de 24 dias de teste de campo de um sistema conversor fotovoltaico de alta potência instalado na cidade de Atlanta, na Geórgia, conforme [104]. Para conversores de diferentes classificações de energia ou fabricantes, a taxa de reparo pode ser bem diferente, uma vez que é afetada por vários fatores, incluindo a detecção de falha, o diagnóstico de falhas, deslocamentos para manutenção, instalação de peças sobressalentes, reparo do sistema e reinicialização do sistema. No entanto, a estrutura de avaliação de confiabilidade e otimização de custos para determinar a arquitetura do conversor paralelo é a mesma. E partindo deste princípio, ou seja, ter a mesma forma de avaliação, faz sentido estudá-la acrescentando outros vieses a fim de enriquecer a análise.

Entre os vários índices de confiabilidade discutidos anteriormente, foram selecionadas a taxa de falha e a disponibilidade como critérios de avaliação da confiabilidade do sistema. A taxa de falha e a disponibilidade decidem o custo de manutenção e reparo e o custo do tempo de inatividade do sistema, respectivamente, que são as duas principais fontes de custo operacional do sistema.

Ao se utilizar desta metodologia, busca-se partir com um dado de entrada, λ , trabalhar e manipulá-lo a fim de que com o tratamento dos dados internos como MTBF, MTTR, a Disponibilidade, dentre outras, seja alcançado o custo direto, e que estes custos,

também tratados, sejam restrições impostas pela configuração previamente ótima com redundância na intenção de encontrar uma configuração que de fato entregue o número de conversores paralelos N e de conversores redundantes X e o custo final otimizado capaz de apresentar confiabilidade a determinado projeto, de forma que este seja viável. A seguir, na Figura 27, observa-se um diagrama que inclui o método proposto com o fluxo de informações, entradas e saídas que se deseja executar.

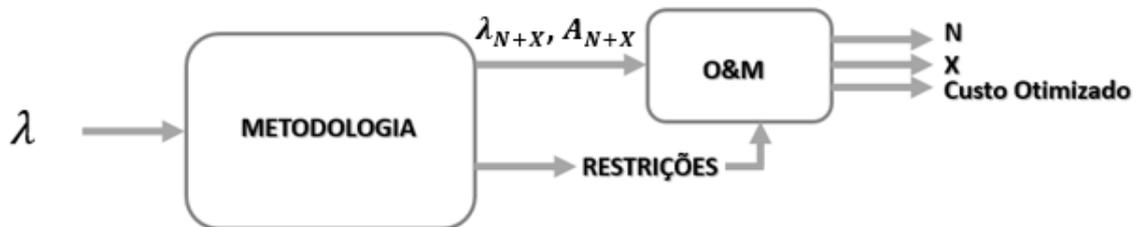


Figura 27 - Diagrama de Fluxo de Informações, Entradas e Saídas.

Capítulo 6 - Estudo de Caso: Avaliação da Confiabilidade e Custos de O&M

Para avaliar a confiabilidade do sistema conversor paralelo sob diferentes estratégias de controle e topologias, tomou-se um sistema de conversão de energia de 1000 kW como exemplo e, assim, serão estudados e analisados três casos, que serão apresentados nas seções seguintes. Em cada um deles será calculada a disponibilidade do sistema, sendo esta grandeza a mais importante para se avaliar a confiabilidade do sistema quando atrelada a taxa de falha do mesmo. E a partir desta grandeza são desenvolvidas as demais análises, tomando por caso base o primeiro caso apresentado: Caso A, o mais simples. No segundo caso, o B, será inserida a redundância, já apresentando então um cenário mais completo e complexo, com o desenvolvimento da análise, sendo possível observar nos gráficos o panorama do estudo se elucidando, onde notamos a taxa de falha do sistema evoluindo e melhorando à medida que se aumenta o número de conversores redundantes. Do mesmo modo comportar-se-á a disponibilidade. Já no terceiro e último caso, o C, permanecerá a análise com conversores redundantes, porém o sistema estará sob condições de distribuição dinâmica de energia, um fator que não só fará com que a energia seja compartilhada entre eles, mas também permitirá com que todos os conversores, principais e redundantes, não operem em sua potência máxima e nem durante todo o tempo. Dessa forma, ante a análise, será visto o melhor cenário, onde, não somente a disponibilidade/confiabilidade, mas também os custos serão apresentados com formato de projeto mais atrativo. O que será analisado e confirmado com as seções subsequentes com a avaliação do custo otimizado da arquitetura do sistema atrelado ao entendimento do custo operacional, o qual está vinculado aos custos de operação e manutenção do sistema, sendo detalhada cada parcela deste custo, e então ser otimizado. Ao se determinar a redundância, a quantidade de conversores que deverão compor o sistema será sempre estimado dividindo igualmente as potências pelo número ótimo de conversores determinado pelo método, utilizando-se assim do benefício do controle por

distribuição dinâmica de energia, onde os equipamentos não operam no extremo de sua potência nominal e nem por todo tempo, uma vez que os conversores entram e saem de operação conforme configurado neste tipo de controle [11]. E aí na última seção, uma breve análise para a viabilidade de projeto baseado neste estudo de exemplo.

Novamente, conforme já dito acima, podemos aplicar o método em um sistema exemplo, uma vez que a estrutura de avaliação de confiabilidade e otimização de custo é a mesma [104].

Este estudo verificou, tratou conceitos e métodos, analisou e avaliou a implantação nos sistemas de interesse que envolvem conversores eletrônicos de potência e teve como principal resultado a elaboração de um método consolidado para determinação da configuração das unidades conversoras de um sistema de conversão de energia. A apresentação do método será realizada através da sua aplicação nos casos de estudo de um projeto de geração fotovoltaica, objetivando sua apresentação de forma didática e de um modo que independa da localidade ou da moeda local. Tratando então, de uma avaliação de investimento sem tratar de questões mais específicas como valor presente, valor futuro ou variáveis sensíveis, buscando mais a questão da confiabilidade e redundância de maneira mais técnica. A fim de chegar a soluções mais exatas, as análises ativeram-se a um intervalo de 5 anos.

6.1 Caso A: Confiabilidade da Operação com Um Único Conversor

Para este caso, será considerado como caso base considerando ser o mais simples, uma vez que quando todo o sistema é implementado com um único conversor, a taxa de falha do sistema e a disponibilidade são dadas e calculadas de acordo com as equações já detalhadas acima, da seguinte forma:

$$\lambda_{tot,1} = 0,18/ano \quad (23)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_{tot,1}} \approx 5,5 \text{ anos} \quad (24)$$

$$\mu_{tot,1} = \frac{365}{24} \approx 15,2/ano \quad (25)$$

$$A_1 = \frac{\mu_{tot,1}}{\mu_{tot,1} + \lambda_{tot,1}} = 0,9883 \quad (26)$$

6.2 Caso B: Confiabilidade dos Conversores Paralelos $N+X$

Para um sistema paralelo de arquitetura $N + X$, conforme mostrado na Figura 24, o sistema opera quando N conversores do total de conversores $N + X$ operam. Caso assumamos que as falhas dos conversores paralelos são independentes, o sistema satisfaz o modelo de confiabilidade *k-out-of-n* [73], ou seja, numa quantidade de k conversores, um total de n devem operar.

Dessa forma, a função confiabilidade do sistema torna-se conforme segue na equação (27):

$$R_{N+X} = \sum_{j=N}^{N+X} \binom{N+X}{N} R^j (1-a)^{N+X-j} \quad (27)$$

Assim, a taxa de falha do sistema conversor paralelo $N + X$ é dado como:

$$\lambda_{N+X} = \frac{1}{MTBF_{N+X}} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} \sum_{j=N}^{N+X} \frac{1}{j}} \quad (28)$$

De mesmo modo, a disponibilidade geral do sistema, vem de:

$$A_{N+X} = \sum_{j=N}^{N+X} \binom{N+X}{N} A^j U^{N+X-j} \quad (29)$$

A Figura 28 e Figura 29 mostram os gráficos de taxa de falha e disponibilidade do sistema com $N + X$ conversores paralelos de acordo com que N e X variam.

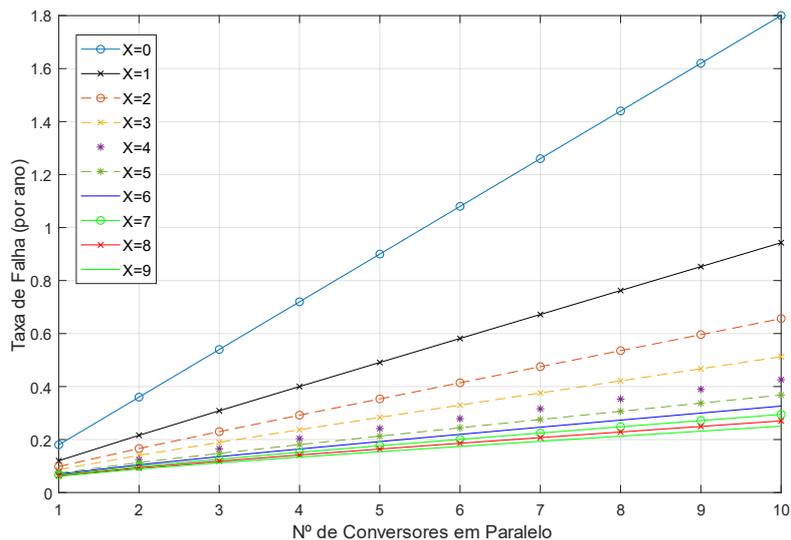


Figura 28 - Variação da Taxa de Falha de um Sistema Conversor Paralelo com N + X Redundância.

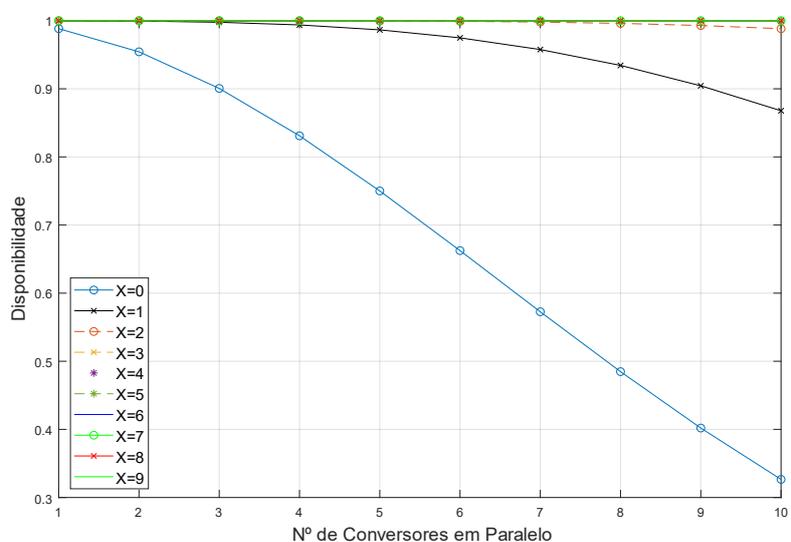


Figura 29 - Disponibilidade do Sistema Conversor Paralelo Redundante de $N + X$.

Como esperado, a taxa de falha e a disponibilidade do sistema aumentam à medida que é aumentado o nível de redundância. Verificando assim, que a disponibilidade fica bem próxima de 100% com $X \geq 3$, ou seja, com 3 ou mais conversores redundantes no sistema, a disponibilidade mostra-se cada vez mais atrativa, que por consequência, a confiabilidade também.

Observando a Figura 28, nota-se em primeiro momento que, conforme aumenta-se o número de conversores principais a taxa de falha também é aumentada, fator negativo uma vez que se deseja diminuir essa taxa de falha. Entretanto, ao se inserir gradativamente

conversores redundantes (curvas coloridas “X”) é possível observar a diminuição da taxa de falha a valores bem baixos, possibilitando assim o paralelismo com maior número de conversores.

Este mesmo fator positivo é observado na Figura 29, ou seja, o aumento gradativo de conversores redundantes eleva a disponibilidade do sistema a valores próximos de 1,0.

Ao tomar por base o estudo do caso A, se for implementado um sistema de conversão de energia com 3 conversores em paralelo, com um conversor redundante, de acordo com as equações (28) e (29), tem-se que:

$$\lambda_{3+1} = \frac{1}{\frac{1}{0,18} \times \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4}\right)} = 0,309 / \text{ano} \quad (30)$$

$$MTBF_{3+1} = \frac{1}{\lambda_{3+1}} \approx 3,24 \text{ anos} \quad (31)$$

$$\mu_{3+1} = \mu_1 = 15,2 / \text{ano} \quad (32)$$

$$A_{3+1} = \sum_{j=3}^{3+1} \binom{3+1}{3} A_1^j U_1^{3+1-j} = 0,9992 \quad (33)$$

Onde λ_{3+1} , $MTBF_{3+1}$, μ_{3+1} e A_{3+1} são a taxa de falha do sistema equivalente, o ciclo médio de vida, a taxa de reparo e a disponibilidade dos conversores paralelos redundantes, respectivamente. Ao ser comparado com o conversor único do caso A, embora a operação do caso B aumente a taxa de falha do sistema (uma vez que há mais equipamentos, naturalmente a taxa de falha irá aumentar), a probabilidade de o sistema permanecer em estados de sucesso, ou seja, disponível para operação (vide o aumento da A - Disponibilidade), aumentou de 0,9883 para 0,9992. Esta avaliação torna-se de grande importância sobretudo quando a escala de energia do sistema é alta e o tempo de inatividade por dia é significativo.

6.3 Caso C: Confiabilidade de Conversores Paralelos $N + X$ Sob Condições de Distribuição Dinâmica de Energia

De acordo com a Figura 30 a seguir, pode ser observado o princípio do esquema de distribuição dinâmica de energia [11]. Em qualquer ponto de operação o sistema de controle irá operar de forma parcial e seletiva (M) do total de conversores $N + X$ para atingir a eficiência operacional máxima conforme critérios levantados por pesquisadores em [11].

Além disso, quando não há carga pesada, os conversores em operação paralela atenderão a carga alternadamente com os módulos ociosos, melhorando assim o perfil térmico do sistema. Se for implementado um cenário em condições de distribuição dinâmica de energia para o sistema conversor paralelo redundante $N + X \rightarrow (3 + 1)$, 1000 kW, o tempo médio de operação de cada conversor, \bar{T} , será dado conforme a equação (34) [11].

$$\bar{T} = \frac{\overline{P_{load}(t)}}{P_{m\acute{a}x}} T_{tot} \approx 0,45 T_{tot} \quad (34)$$

Portanto, com o mesmo tipo de conversor, o esquema de distribuição dinâmica de energia aumentará o MTBF de cada conversor, pois como os módulos ociosos irão operar juntos, todos os conversores estarão em funcionamento abaixo de sua capacidade máxima, ou seja, suavizando a performance do equipamento, aumentando então o tempo médio entre falhas. Entretanto, todos os índices de confiabilidade de cada conversor sob estas condições deverão ser recalculados.

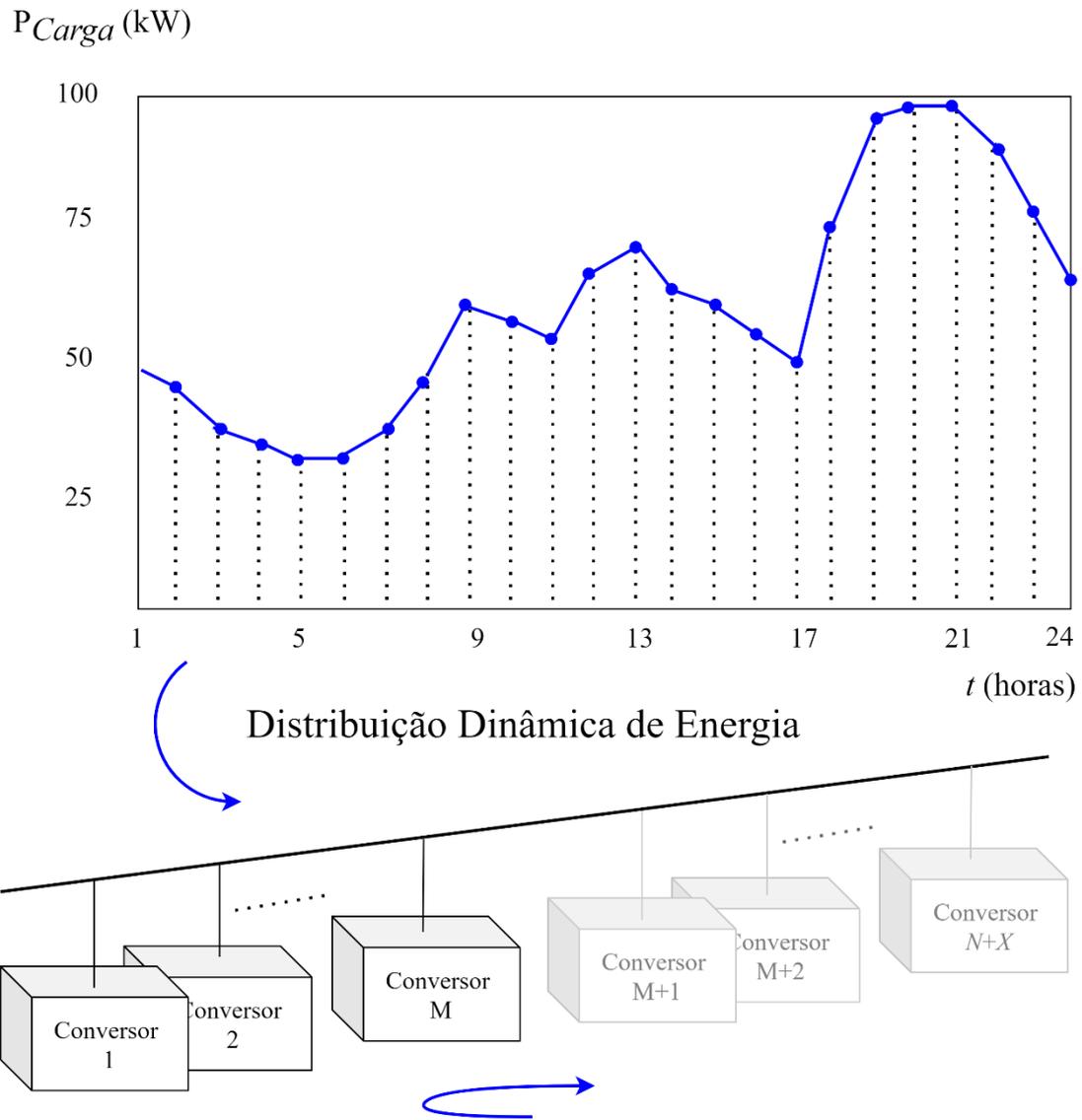


Figura 30 - Ilustração do esquema de distribuição dinâmico de energia.

$$\lambda_{DPD} = \frac{\overline{P_{load}(t)}}{P_{m\acute{a}x}} \times \lambda \approx 0,082 / \text{ano} \quad (35)$$

$$MTBF_{DPD} = \frac{1}{\lambda_{DPD}} = 12,2 \text{ ano} \quad (36)$$

$$\mu_{DPD} = \mu_1 = 15,2 / \text{ano} \quad (37)$$

$$A_{DPD} = \frac{\mu_{DPD}}{\mu_{DPD} + \lambda_{DPD}} = 0,9946 \quad (38)$$

Dessa maneira, os índices de confiabilidade de cada conversor sob o esquema de distribuição dinâmica de energia recalculados acima, o μ_{DPD} , $MTBF_{DPD}$, μ_{DPD} e A_{DPD} são a taxa de falha, a taxa média entre falhas, a taxa de reparo e a disponibilidade do conversor individual dentro do sistema de configuração em paralelo.

Para um sistema de conversores em paralelo redundantes (3 + 1), os índices de confiabilidade equivalentes são derivados de acordo com as equações (28) e (29).

$$\lambda_{3+1, DPD} = \frac{1}{\frac{1}{0,082} \times \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4}\right)} = 0,14 / \text{ano} \quad (39)$$

$$MTBF_{3+1, DPD} = \frac{1}{\lambda_{3+1, DPD}} \approx 7,11 \text{ anos} \quad (40)$$

$$\mu_{3+1, DPD} = \mu_{DPD} = 15,2 / \text{ano} \quad (41)$$

$$A_{3+1, DPD} = \sum_{j=3}^{3+1} \binom{3+1}{3} A_{DPD}^j (1 - A_{DPD})^{3+1-j} = 0,9998 \quad (42)$$

Comparando os resultados da análise de confiabilidade acima com os casos A e B, pode se observar que o esquema de distribuição dinâmica de energia não apenas aumenta a disponibilidade do sistema, mas também reduz a sua taxa de falha. Portanto, o custo de manutenção do sistema e o custo de inatividade serão minimizados. Em contrapartida, porém não a ponto de inviabilizar, ressalta-se o aumento da complexidade da implantação

de um sistema de conversores paralelos, uma vez que o sistema de controle deverá ser adequado à perfeita coordenação da operação dos conversores paralelados.

Conforme mostrado nas Figura 28 e Figura 29, anteriores, independentemente de N , a taxa de falha do sistema e a disponibilidade não serão alteradas de forma significativas após a redundância X do sistema aumentar para 3. Embora a análise de confiabilidade forneça informações sobre como projetar a arquitetura de um sistema e o sistema de controle, apenas as informações de confiabilidade não seriam capazes de fornecer informações sobre como projetar a arquitetura ideal de um sistema $N + X$.

Na seção a seguir, serão discutidos os impactos da confiabilidade no custo do sistema e como projetar (N, X) para otimizar o custo total do sistema.

6.4 Análise de Custo Ótimo da Arquitetura do Sistema

Considerando toda a análise acima e observando a Figura 31 a seguir, podem ser observados os componentes do custo total do sistema e, como é observado, o custo do sistema de conversão de energia inclui o custo de instalação inicial, somado ao custo de operação e manutenção (O&M) e o custo de perda de energia.

O custo da instalação do sistema inclui o investimento da aquisição de conversores de energia e de sistemas de refrigeração. Este último é considerado, independente da aplicação, como 10% do custo do conversor, o qual é considerado proporcional à classificação do sistema, seja de baixa, média ou alta potência [4]. De acordo com os pesquisadores da Solarbuzz [4], o custo do conversor é dado por capacidade, a \$0,715/W.

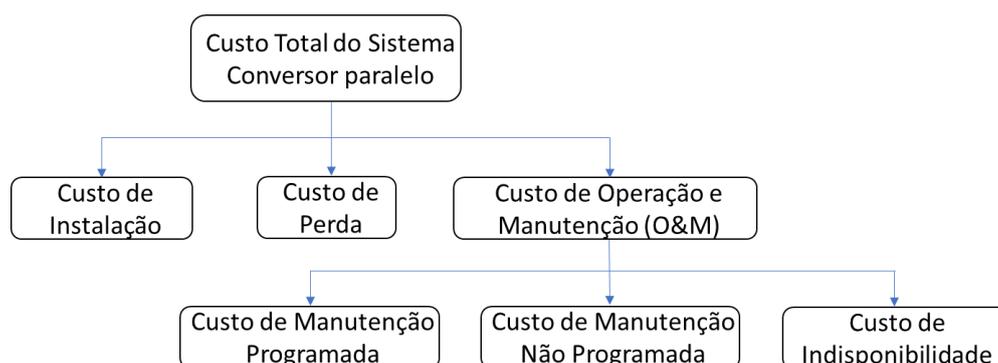


Figura 31 - Diagrama do custo total do sistema conversor paralelo.

Assim, o custo total de instalação de sistema conversor paralelo de P kW com N conversores paralelos e X módulos redundantes, em unidade monetária, é dado pela equação (43), a seguir.

$$C_{inst} = 715 \times P \times \left(1 + \frac{X}{N}\right) \quad (43)$$

6.5 Custos Operacionais – O&M

O custo de O&M de um sistema de conversão de energia consiste em três partes: custo de manutenção programada, custo de manutenção não programada e custo por tempo de inatividade. O primeiro refere-se a ao custo médio anual de O&M, que é de 5 a 6% do custo do investimento [109]. Neste estudo, atém-se a um modelo geral de custos, não sendo assim especificada uma moeda, primeiramente por não encontrar valores de mercado atuais na literatura e também por ser aplicado a um sistema modelo, então toda a parte de custo é representado por \$ ('um valor monetário genérico'). Assim, o custo de manutenção programada para um sistema conversor paralelo com garantia de 20 anos, em unidade monetária, será aplicado como a equação (44) a seguir:

$$C_{O\&M,s} = C_{inst} \times 5\% \times 20 = C_{inst} \quad (44)$$

Por outro lado, o custo de manutenção não programada, refere-se ao custo incorrido por falhas aleatórias do sistema. Este custo inclui não apenas as peças substituídas e o custo da mão-de-obra, mas também outros custos como, por exemplo, o custo da viagem da equipe de suporte técnico. Dessa forma, este custo não programado, em unidade monetária, do sistema de conversão de energia operando em 20 anos, pode ser obtido as equações (45) e (46), a seguir:

$$C_{O\&M,u} = \lambda_{N+X} \times 20 \times (C_{part} + C_{lt} \times MTTR) \quad (45)$$

$$C_{part} = 715 \times P \times \frac{1}{N} \quad (46)$$

onde, λ_{N+X} é a taxa de falha equivalente do sistema conversor paralelo, conforme mostrado na equação (28), C_{part} é o custo da peça substituída e C_{lt} é o custo da mão-de-obra e viagens por reparo. O custo de viagem de equipe por falha é estimado em \$ 300/kW/dia [109]. O MTTR é o tempo médio de reparo do sistema, conforme já mostrado na equação (17). Então, custo de manutenção não programada, em unidade monetária, é dado conforme a equação (47), abaixo:

$$C_{O\&M,u} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} \sum_{j=N}^{N+X} \frac{1}{j}} \times 20 \times \left(715 \times P \times \frac{1}{N} + m \times \frac{1}{\mu} \right) \quad (47)$$

Ao abordar a inatividade, o seu custo estará relacionado à escala de energia do sistema. Supondo que, para um sistema de 1000 kW, o custo do tempo de inatividade por dia é cerca de \$ 1000. Neste sentido, lembrando que um sistema de geração tem sua receita associada diretamente à quantidade de energia gerada, logo se há períodos de inatividade, o custo desta inatividade estará associado à receita que deixou de entrar pela quantidade de energia não gerada. Assim, o custo total do tempo de inatividade em 20 anos, em unidade monetária, pode ser calculado pela equação (48) abaixo:

$$C_{inativ} = 20 \times (1 - A_{N+X}) \times 1000 \times 365 \quad (48)$$

$$C_{inativ} = 20 \times 1 - \sum_{j=N}^{N+X} \binom{N+X}{N} A^j U^{N+X-j} \times 365.000$$

O custo de perda de energia é considerado de \$ 10/kW, que estão associadas às perdas na comutação e condução das chaves semicondutoras e também as perdas por aquecimento dos componentes conectores que podem apresentar falhas de contato e até mesmo a interrupção do equipamento, como também as perdas relacionadas a orientação e inclinação dos módulos, sombreamento e sombreamento parcial, acúmulo de sujeira, degradação e célula rachada/quebrada. Então, o custo de perda de energia de um sistema em uma vida útil de 20 anos será equivalente a:

$$C_{perda} = (1 - \eta) \times P \times 0,87 \times 24 \times 365 = (1 - \eta) \times P \times 7591 \quad (49)$$

onde, η é eficiência do sistema.

Agora com as equações (43), (44) e da (47) a (49), o custo total do de todo sistema pode ser calculado pela equação (50):

$$C_{Tot}(N, X) = C_{inst} + C_{O\&M,s} + C_{O\&M,u} + C_{inativ} + C_{perda}$$

$$C_{Tot} = 715 \times P \times \left(1 + \frac{N}{X}\right) \times 2 \quad (50)$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{\lambda} \sum_{j=N}^{N+X} \frac{1}{j}} \times 20 \times \left(715 \times P \times \frac{1}{N} + m \times \frac{1}{\mu}\right) + 20 \times (1$$

$$- \eta) \times P \times 7591$$

Portanto, através da minimização de $C_{Tot}(N, X)$, a configuração ideal do sistema conversor paralelo $N + X$ pode ser obtida. Uma vez que a análise de confiabilidade mostra que a taxa de falha do sistema e a disponibilidade não alteram de forma a se considerar quando $X > 3$, independentemente do valor de N , é possível resolver a equação (50) de maneira simplificada, ou seja, encontrando o valor mínimo de C_{Tot} quando $X = 1, 2, 3$.

Dessa forma, tomam-se os casos anteriores na análise de confiabilidade como exemplo. A potência nominal $P = 1000kW$ e a taxas de falha e de reparo do conversor individual 0,18/ano e 15,2/ano, respectivamente.

Os resultados da simulação do custo total do sistema sob diferentes níveis de redundância são mostrados nas Figura 32 e Figura 33.

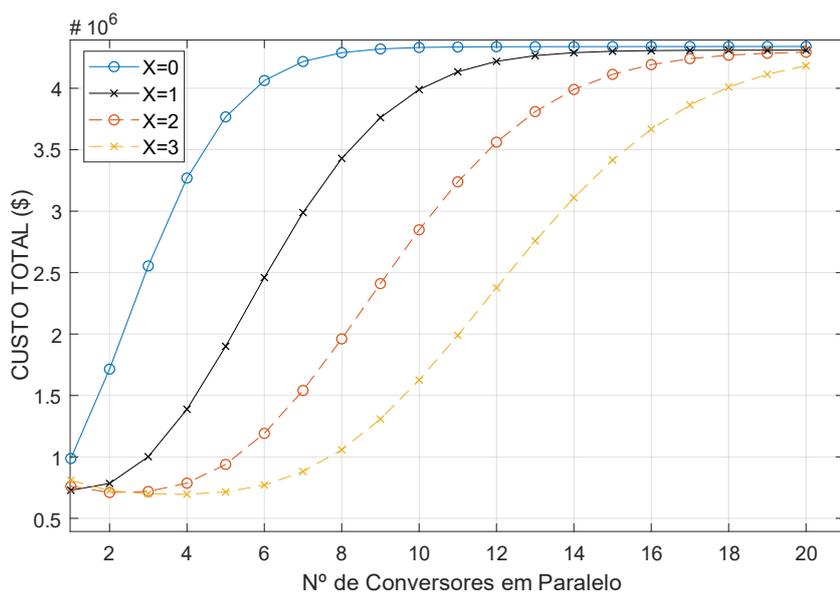


Figura 32 - Custo Total do Sistema Conversor de Energia de 1000 kW sob diferentes graus de redundância.

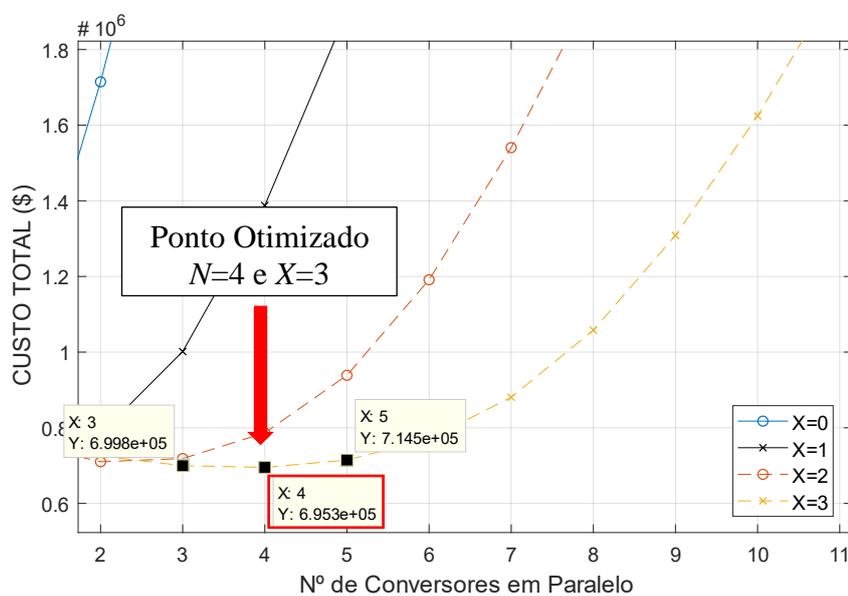


Figura 33 - Custo Total do Sistema Conversor de Energia de 1000 kW: Detalhe do Ponto Ótimo.

Conforme nas figuras acima indicadas, o custo total do sistema é minimizado quando $N = 4$ e $X = 3$.

- i. Redução do Custo Total do Sistema com Esquema de Distribuição Dinâmica de Energia

O esquema de distribuição dinâmica de energia reduz o custo total do sistema. Ao observar a Figura 30, o sistema de controle selecionará o número de conversores em operação de acordo com a condição de carga para minimizar a perda de energia do sistema. De acordo com [11], em condições de carga leve, a eficiência do sistema tende a ser aumentada entorno de 10 a 15%, com incremento médio de eficiência de aproximadamente 3%. Além disso, diminuindo a taxa de falha do sistema e aumentando a disponibilidade como observado nas Figura 34 e Figura 35.

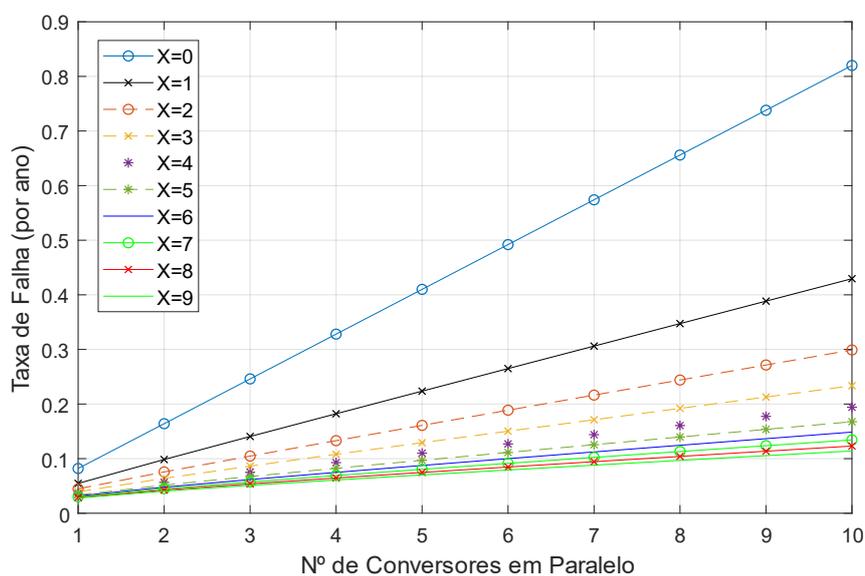


Figura 34 - Taxa de Falha do Sistema com Distribuição Dinâmica de Energia.

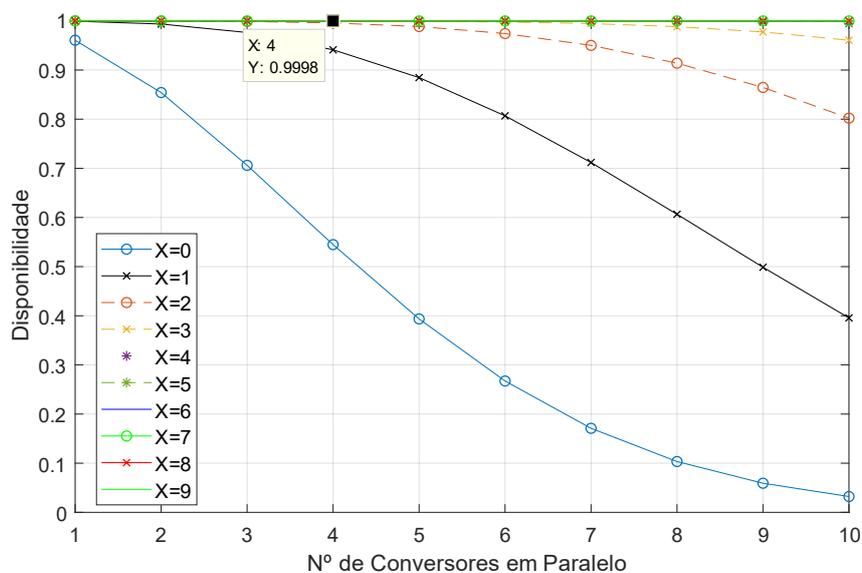


Figura 35 - Disponibilidade do Sistema com Distribuição Dinâmica de Energia.

Ao se considerar o mesmo sistema de 1000 kW com conversor paralelo de estrutura ótima, a redução do custo total do sistema calculada pela equação (50), será recalculada conforme a equação (51) a seguir:

$$\Delta C_{tot} = C_{tot}(4,3) - C_{tot_{DPD}}(6,3) = \$29.000 = 4,17\%C_{tot} \quad (51)$$

Onde, $C_{tot}(4,3)$ é o custo total do sistema sob o controle de compartilhamento de corrente convencional, quando o sistema tem 4 módulos principais e 3 módulos redundantes, e $C_{tot_{DPD}}$ é o custo total do sistema quando o esquema de distribuição dinâmica de energia é aplicado, apresentando um custo otimizado com configuração de 6 módulos principais e 3 módulos redundantes conforme Figura 36 e Figura 37 a seguir.

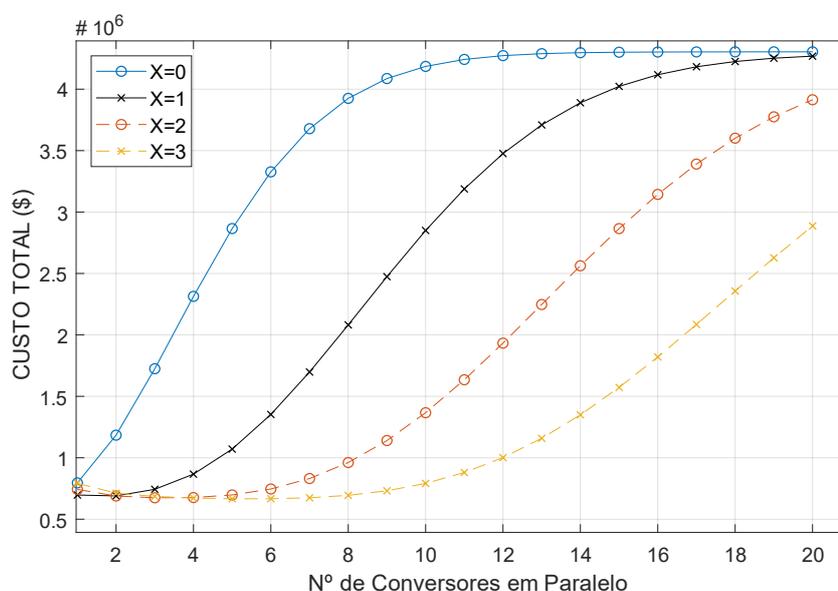


Figura 36 - Custo Total do Sistema Conversor de Energia de 1000 kW sob diferentes graus de redundância, com Distribuição Dinâmica de Energia.

Note que ao se utilizar da distribuição dinâmica de energia, os módulos podem entrar e sair ou até mesmo operarem todos juntos (principais e redundantes) em capacidade de 10 a 20% da nominal de cada um deles, utilizando-se assim menos tempo, impactando em menos perdas por aquecimento, chaveamento, dentre outros, diminuindo assim sua utilização no total de tempo T_{tot} bem como em tempo de operação em sua potência máxima. Fator que, notoriamente reduz a taxa de falha, o MTTR e eleva a disponibilidade, abrindo espaço para a entrada de mais equipamentos conversores no

sistema, de potência nominal menores que os primeiros, aumentando assim sua disponibilidade, e ainda assim reduzindo o custo total. Neste sistema exemplo de 1000 kW, no primeiro cenário de custo total, o sistema seria composto por 7 conversores de 250 kW cada um, (com 4 conversores principais e 3 redundante), já no segundo cenário, o sistema teria 9 conversores de 170 kW cada, (com 6 módulos principais e 3 redundantes), obtendo então uma configuração com equipamentos de potências menores, com custo mais baixo e ainda assim, em caso de uma falha de maior porte, a redundância será capaz de sustentar o sistema $N - 3$ módulos principais.

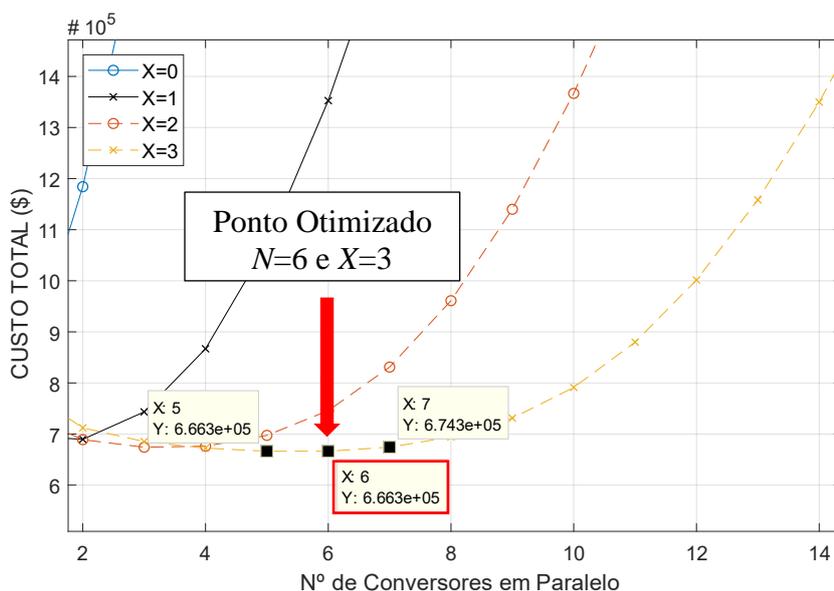


Figura 37 - Custo Total do Sistema Conversor de Energia de 1000 kW sob diferentes graus de redundância, com Distribuição Dinâmica de Energia: Detalhe do Ponto Ótimo.

Portanto, adotar o esquema de distribuição dinâmica, não apenas irá melhorar a confiabilidade do sistema conversor paralelo, mas também irá minimizar o custo total deste sistema.

6.6 Análise de Viabilidade de Projeto

Para esta avaliação, com todo conteúdo explanado nas seções anteriores, faz-se necessário verificar então a que ponto um determinado projeto de geração fotovoltaica pode ser viável ou não para o investidor.

Através das análises e disposições acima, a partir da taxa de falha (λ) dos componentes do conversor, foi equacionado, a fim de encontrar a melhor configuração para o número de conversores em paralelo e conversores redundantes. Daí em diante, partiu-se para relacionar a melhor configuração e otimizar o custo para tal cenário, tanto para a situação de compartilhamento de corrente de modo convencional quanto para o modo de distribuição dinâmica de energia e, neste sentido, poder avaliar a confiabilidade do sistema frente ao custo imputado.

No ano de 2020, o setor fotovoltaico alcançou recordes de investimentos com cerca de R\$ 13 bilhões somando geração distribuída e centralizada. Assim, espera-se que até o final deste ano de 2021 seja investida a quantia de R\$ 22 bilhões em todo Brasil [110]. Grande parte destes valores são investidos em usinas solares fotovoltaicas, e uma das modalidades que tem atraído a atenção de investidores é, por exemplo, a locação de grandes usinas em geração distribuídas. Nesta modalidade, basicamente um investidor faz a locação de determinada usina para uma empresa a fim de reduzir seus custos com consumo de energia. E com o aumento desta demanda, e por diversos outros motivos, a construção deste tipo de usinas vem crescendo. Dessa forma, faz-se necessário avaliar técnica e economicamente a viabilidade de um projeto pelo investidor.

Nesta seção, buscou-se verificar uma avaliação de forma geral e uniforme que possa validar tal estudo, independente da localidade onde se deseja alocar o projeto, seja no Brasil ou exterior, com equações e gráficos que independem da moeda local. (Esta nota se faz necessário uma vez que este estudo foi elaborado sem estabelecer moeda específica para que seja avaliada de maneira geral). Bem como, por se tratar, também, de uma avaliação de investimento financeiro sem aprofundamentos como testes de sensibilidade trazendo a valor presente líquido e variáveis sensíveis, a fim de ser mais assertivo, as avaliações neste estudo foram em período de tempo de 5 anos.

De acordo com o gráfico da Figura 38 a seguir, a qual foi gerado a partir dos passos das seções acima, mostra o ponto em que se deseja trabalhar para o projeto escolhido, ou seja, 6 conversores principais e 3 redundantes. Este será o ponto de análise, onde no eixo das ordenadas lê-se o Custo Total por Energia entregue à rede (\$/kWh).

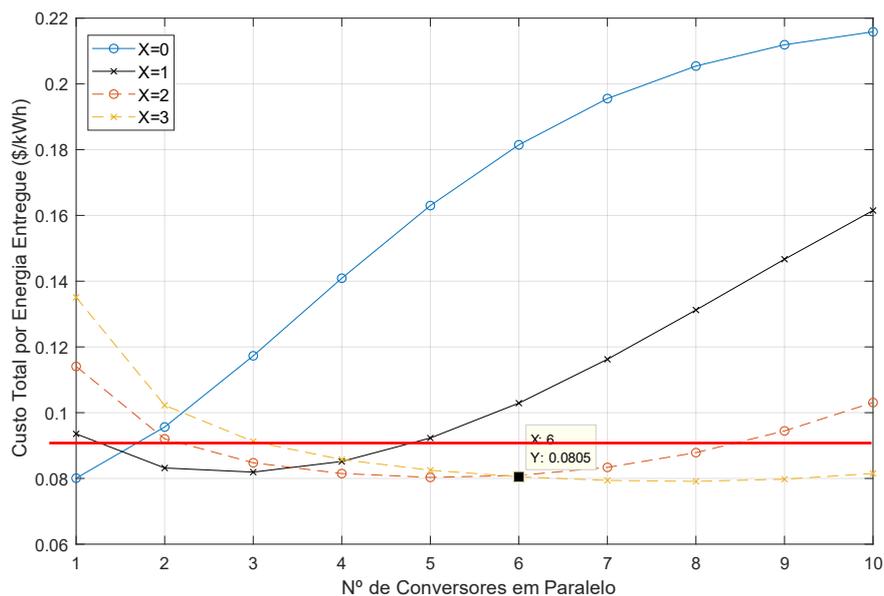


Figura 38 - Custo Total do Sistema por Energia Injetada na Rede.

A remuneração para este tipo de empreendimento depende do local (da concessionária de distribuição), podendo assim variar nas diversas regiões do Brasil, conforme o valor pago por kWh injetado. Ao observar a reta horizontal traçada no gráfico acima, qualquer remuneração abaixo de \$0,081/kWh torna o projeto inviável, tendo o investidor que buscar as regiões onde a remuneração seja acima deste valor, para que assim alcance a viabilidade do projeto e o mesmo seja rentável.

Capítulo 7 - Conclusão e Trabalhos Futuros

Esse trabalho apresentou um estudo de metodologias de determinação de configuração ótima para conversores aplicados a sistemas de geração de energia solar fotovoltaica. Nesta seara, a sua crescente utilização no Brasil e no mundo exige que haja qualidade nos equipamentos utilizados, como também sejam sistemas confiáveis e com disponibilidade aceitável para um correto fornecimento de energia.

A abordagem técnica sob aspectos qualitativos e quantitativos da teoria tal como foi abordado nos capítulos iniciais desta dissertação é de suma importância para se conhecer melhor as tecnologias que surgem, as que são mais utilizadas, mesmo as mais inovadoras que ainda não estão estabelecidas no mercado, pois de toda as formas, para se alcançar a fase de implantação de projeto, é sempre necessário verificar o quão confiável é determinado projeto até que se faça o investimento propriamente dito. Dessa forma, manter um excelente nível de qualidade buscando otimizar os custos, faz-se uma condição *sine qua non* do sucesso do empreendimento.

Os problemas técnicos esperados quando um alto nível de geração fotovoltaica é inserida na rede já são relatados em outros países, onde esse tipo de geração está mais desenvolvido e mais disseminado, problemas esses que passam muito pela confiabilidade e disponibilidade destes sistemas, assim como o custo desse investimento.

Assim, este estudo se propôs, primeiramente elaborar uma sensível pesquisa bibliográfica, fazendo uma varredura no que vem sendo pesquisado nos últimos 15 anos sobre o tema. Passando por diversas análises e métricas para avaliar a confiabilidade e disponibilidade de um sistema de geração de energia com conversores conectados em paralelo. Assim notou-se que não é um assunto tão difundido na literatura no que tange a verificar a confiabilidade *versus* otimização de custos para implantação de conversores em paralelo com redundância destes.

Desse modo, o esforço dessa dissertação ateve-se a analisar principalmente a modelagem da confiabilidade e a otimização de custos de conversores conectados em paralelo com redundância e aplicá-lo em um determinado sistema de geração fotovoltaica hipotético, com diferentes configurações com $N + X$ conversores e estratégias de controle, como a de Distribuição Dinâmica de Energia. Com um determinado modelo de

confiabilidade e custo, uma métrica foi estabelecida e para determinar a arquitetura do sistema com respeito à otimização da confiabilidade e do custo.

Os resultados desta análise de confiabilidade e custo mostraram que a configuração de controle onde há a distribuição dinâmica de energia atinge maior confiabilidade e menor custo operacional quando comparado com o método convencional de compartilhamento de corrente média. Vale ressaltar que este modo aumenta a disponibilidade e conseqüentemente a confiabilidade do sistema, melhorando a taxa de falha (λ) e a taxa de reparo (μ), pois o modo de controle escolhido faz com que todos os conversores, inclusive os redundantes, operem ao mesmo tempo, entrando e saindo de operação, diminuindo não só o tempo de operação, mas também reduz o nível de potência em que cada conversor opera, não exigindo do equipamento operação em sua capacidade nominal. Fator este, que possibilitando a redução substancial de custo viabiliza a entrada de mais 2 equipamentos conversores no sistema e ainda sim mantendo o custo marginal mais baixo com todas as melhorias intrínsecas.

Ainda como parte da análise, foi estabelecida uma métrica de para viabilidade de projeto, com base no custo otimizado em função de onde se deseja implantar o projeto. Ou seja, com isso tornou-se possível avaliar mediante remuneração local pela injeção de energia na rede onde a implantação de determinado projeto pode ser economicamente viável e rentável. Uma vez que para cada concessionária de distribuição há um valor de remuneração, e assim de acordo com o gráfico de viabilidade de projeto qualquer ponto abaixo da reta traçada denota uma remuneração (\$/kWh) abaixo do mínimo para viabilizar o projeto, tendo então, o investidor, que buscar uma localidade que possa remunerar a potência injetada em valores acima da reta, e quanto mais acima maior será o retorno financeiro.

Como trabalhos futuros, os estudos nesse trabalho apontam para o prosseguimento das análises com sistemas reais existentes no estacionamento do Centro de Tecnologia da UFRJ que são frutos de projetos de pesquisa e desenvolvimento do grupo de pesquisa do qual faço parte, no LEMT (Laboratório de Eletrônica de potência e Media Tensão), trazendo assim, não só valores de investimentos financeiros, mão-de-obra técnica, etc., mais reais e atuais, sobretudo índices de taxa de falhas dos dispositivos próximos da realidade utilizada no Brasil, onde este último foi a principal dificuldade de informação, pois o fabricante não dispunha em tempo hábil para esta defesa de dissertação por

diversos fatores, a começar com o atendimento da assistência técnica até ao momento de pandemia vivido nos últimos tempos.

Fazendo então, tal análise mais aprofundada com maior amplitude de tempo, como por exemplo em um horizonte de 20 anos de concessão, trazendo os cálculos de valor presente líquido, testes de sensibilidade nas variáveis, bem como dois ou três setores com diferentes remunerações, tudo aplicado a sistemas de potência instalada mais elevada, saindo da faixa de mini e microgeração. Embora este trabalho entregue uma avaliação genérica, podendo ser aplicada em qualquer situação, bastando adequar os valores técnicos e monetários, um possível trabalho futuro visa trazer em forma de “manual” para que não só seja balizador para o momento, mas que também seja mais assertivo no longo prazo, como em 10 ou 20 anos de avaliação.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Lohani *et al.*, “REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Annual Reporting on Renewables: Ten year of excellence”, p. 251, 2015.
- [2] “Renewable energy statistics/pt, ‘Statistics Explained’, p. 11, 2020”. Acessado: 15 de julho de 2020. [Online]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/64879.pdf>
- [3] “Renewable Energy Cost Analysis: Solar Photovoltaics”. Acessado: 16 de julho de 2020. [Online]. Disponível em: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf
- [4] “Solarbuzz, Inverter Price Highlights”, *Omdia*. <https://omdia.tech.informa.com/> (acessado 8 de julho de 2021).
- [5] A. Ristow, M. Begovic, A. Pregelj, e A. Rohatgi, “Development of a Methodology for Improving Photovoltaic Inverter Reliability”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 7, p. 2581–2592, jul. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.924017.
- [6] Xiao Sun, Yim-Shu Lee, e Dehong Xu, “Modeling, analysis, and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, n° 3, p. 844–856, maio 2003, doi: 10.1109/TPEL.2003.810867.
- [7] D. Hirschmann, D. Tissen, S. Schroder, e R. W. De Doncker, “Reliability Prediction for Inverters in Hybrid Electrical Vehicles”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, n° 6, p. 2511–2517, nov. 2007, doi: 10.1109/TPEL.2007.909236.
- [8] Y. Ito e O. Iyama, “Parallel redundant operation of UPS with robust current minor loop”, in *Proceedings of Power Conversion Conference - PCC '97*, ago. 1997, vol. 1, p. 489–494 vol.1. doi: 10.1109/PCCON.1997.645660.
- [9] T. Kawabata e S. Higashino, “Parallel operation of voltage source inverters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, n° 2, p. 281–287, mar. 1988, doi: 10.1109/28.2868.

- [10] X. Yu, A. M. Khambadkone, H. Wang, e S. T. S. Terence, “Control of Parallel-Connected Power Converters for Low-Voltage Microgrid—Part I: A Hybrid Control Architecture”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, n° 12, p. 2962–2970, dez. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2087393.
- [11] X. Yu, H. H. Wang, e A. M. Khambadkone, “Control of paralleled PEBBs to facilitate the efficient operation of microgrid”, in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, jul. 2010, p. 2217–2222. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637808.
- [12] J. M. Carrasco *et al.*, “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, n° 4, p. 1002–1016, jun. 2006, doi: 10.1109/TIE.2006.878356.
- [13] F. Blaabjerg, Zhe Chen, e S. B. Kjaer, “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, n° 5, p. 1184–1194, set. 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.833453.
- [14] J. M. Guerrero, J. C. Vásquez, e R. Teodorescu, “Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids — a general approach towards standardization”, in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, nov. 2009, p. 4305–4310. doi: 10.1109/IECON.2009.5414926.
- [15] G. Petrone, G. Spagnuolo, R. Teodorescu, M. Veerachary, e M. Vitelli, “Reliability Issues in Photovoltaic Power Processing Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 7, p. 2569–2580, jul. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.924016.
- [16] A. L. Julian e G. Oriti, “A Comparison of Redundant Inverter Topologies to Improve Voltage Source Inverter Reliability”, in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, out. 2006, vol. 4, p. 1674–1678. doi: 10.1109/IAS.2006.256761.
- [17] A. Maish, “Defining requirements for improved photovoltaic system reliability”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 7, n° 3, p. 165–173, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(199905/06)7:3<165::AID-PIP270>3.0.CO;2-S.
- [18] E. A. Mahrous, N. A. Rahim, e W. P. Hew, “Three-phase three-level voltage source inverter with low switching frequency based on the two-level inverter

topology”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 1, n° 4, p. 637, 2007, doi: 10.1049/iet-epa:20060280.

[19] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai, e Fang Zheng Peng, “Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, n° 4, p. 724–738, ago. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801052.

[20] A. Nabae, I. Takahashi, e H. Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-17, n° 5, p. 518–523, set. 1981, doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.

[21] T. Bruckner, S. Bernet, e H. Guldner, “The active NPC converter and its loss-balancing control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, n° 3, p. 855–868, jun. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.847586.

[22] K. Rajashekara, “Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, n° 1, p. 3–10, mar. 2013, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2259614.

[23] M. Hashad e J. Iwaszkiewicz, “A novel orthogonal-vectors-based topology of multilevel inverters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, n° 4, p. 868–874, ago. 2002, doi: 10.1109/TIE.2002.801234.

[24] D. Krug, M. Malinowski, e S. Bernet, “Design and comparison of medium voltage multi-level converters for industry applications”, in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, out. 2004, vol. 2, p. 781–790 vol.2. doi: 10.1109/IAS.2004.1348503.

[25] R. B. Godoy, “Paralelismo de Inversores Monofásicos, Isolados ou em Conexão com a Rede, com Otimização da Resposta Dinâmica”, *UNESP - Tese de Doutorado*, p. 160, 2010.

[26] Afonso, M., Laurindo, B. M., França, B.W., Maciel, R. S., e Aredes, M., “OPENDSS MODELING FOR STEADY-STATE ANALYSIS OF DISTRIBUTED GENERATION CONTROL TECHNIQUES”, apresentado em XXII Congresso Brasileiro de Automática, João Pessoa, Paraíba, Brasil, 2018. doi: 10.20906/CPS/CBA2018-0391.

- [27] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, e K. Mauch, “Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections”, in *Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference*, fev. 1997, vol. 1, p. 94–100 vol.1. doi: 10.1109/APEC.1997.581439.
- [28] X. Zhang, J. Liu, Z. You, e L. Zhou, “Small-signal analysis and modeling of parallel inverters based on the droop control method in micro-grid”, in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, set. 2013, p. 4580–4586. doi: 10.1109/ECCE.2013.6647314.
- [29] W. Zhang, D. Xu, P. N. Enjeti, H. Li, J. T. Hawke, e H. S. Krishnamoorthy, “Survey on Fault-Tolerant Techniques for Power Electronic Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, n° 12, p. 6319–6331, dez. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2304561.
- [30] J. Li, A. Q. Huang, Z. Liang, e S. Bhattacharya, “Analysis and Design of Active NPC (ANPC) Inverters for Fault-Tolerant Operation of High-Power Electrical Drives”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, n° 2, p. 519–533, fev. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2143430.
- [31] N. Celanovic e D. Boroyevich, “A fast space-vector modulation algorithm for multilevel three-phase converters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, n° 2, p. 637–641, mar. 2001, doi: 10.1109/28.913731.
- [32] P. Lezana, J. Pou, T. A. Meynard, J. Rodriguez, S. Ceballos, e F. Richardeau, “Survey on Fault Operation on Multilevel Inverters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, n° 7, p. 2207–2218, jul. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2032194.
- [33] U.-M. Choi, K.-B. Lee, e F. Blaabjerg, “Diagnosis and Tolerant Strategy of an Open-Switch Fault for T-Type Three-Level Inverter Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n° 1, p. 495–508, jan. 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2269531.
- [34] M. Arifujjaman, M. T. Iqbal, e J. E. Quicoe, “A comparative study of the reliability of the power electronics in grid connected small wind turbine systems”, in *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, maio 2009, p. 394–397. doi: 10.1109/CCECE.2009.5090161.

- [35] A. Mohammadpour, S. Sadeghi, e L. Parsa, “A Generalized Fault-Tolerant Control Strategy for Five-Phase PM Motor Drives Considering Star, Pentagon, and Pentacle Connections of Stator Windings”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n° 1, p. 63–75, jan. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2247011.
- [36] M. Shahbazi, P. Poure, S. Saadate, e M. R. Zolghadri, “Fault-Tolerant Five-Leg Converter Topology With FPGA-Based Reconfigurable Control”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, n° 6, p. 2284–2294, jun. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2191754.
- [37] J. Liu, J. Yao, S. Yang, e K. Wang, “Loss analysis of two kinds of flexible HVDC converters”, in *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, jun. 2012, vol. 3, p. 1669–1674. doi: 10.1109/IPEMC.2012.6259086.
- [38] J. Andreu, I. Kortabarria, E. Ibarra, I. M. de Alegría, e E. Robles, “A new hardware solution for a fault tolerant matrix converter”, in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, nov. 2009, p. 4469–4474. doi: 10.1109/IECON.2009.5414858.
- [39] A. Chen, C. Zhang, X. He, e N. Cui, “Fault-tolerant design for flying capacitor multilevel inverters”, in *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, maio 2009, p. 1460–1464. doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157616.
- [40] Y. Song e B. Wang, “A hybrid electric vehicle powertrain with fault-tolerant capability”, in *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, fev. 2012, p. 951–956. doi: 10.1109/APEC.2012.6165933.
- [41] M. Naidu, S. Gopalakrishnan, e T. W. Nehl, “Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor Drive Topologies for Automotive X-By-Wire Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, n° 2, p. 841–848, mar. 2010, doi: 10.1109/TIA.2009.2039982.
- [42] S. Ceballos, J. Pou, J. Zaragoza, E. Robles, J. L. Villate, e J. L. Martin, “Fault-Tolerant Neutral-Point-Clamped Converter Solutions Based on Including a Fourth

Resonant Leg”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 6, p. 2293–2303, jun. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2069075.

[43] J. A. Restrepo, A. Berzoy, A. E. Ginart, J. M. Aller, R. G. Harley, e T. G. Habetler, “Switching Strategies for Fault Tolerant Operation of Single DC-link Dual Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, n° 2, p. 509–518, fev. 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2161639.

[44] K. Shen *et al.*, “A modulation reconfiguration based fault-tolerant control scheme for modular multilevel converters”, in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, mar. 2013, p. 3251–3255. doi: 10.1109/APEC.2013.6520766.

[45] G. T. Son *et al.*, “Design and Control of a Modular Multilevel HVDC Converter With Redundant Power Modules for Noninterruptible Energy Transfer”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, n° 3, p. 1611–1619, jul. 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2190530.

[46] F. Carnielutti, H. Pinheiro, e C. Rech, “Generalized Carrier-Based Modulation Strategy for Cascaded Multilevel Converters Operating Under Fault Conditions”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, n° 2, p. 679–689, fev. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2157289.

[47] L. Asiminoaei, E. Aeloiza, P. N. Enjeti, e F. Blaabjerg, “Shunt Active-Power-Filter Topology Based on Parallel Interleaved Inverters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 3, p. 1175–1189, mar. 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.907671.

[48] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, e L. Garcia de Vicuna, “Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n° 3, p. 726–736, mar. 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2009274.

[49] A. V. Rocha *et al.*, “A new fault-tolerant realization of the active three-level NPC converter”, in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, set. 2014, p. 3483–3490. doi: 10.1109/ECCE.2014.6953874.

[50] IEEE, “Standard Framework for Reliability Prediction of Hardware”. P1413, 2020.

- [51] O'Connor, P. and Kleyner, A., *Practical Reliability Engineering*. Wiley, 2012.
- [52] H. Wang, K. Ma, e F. Blaabjerg, "Design for reliability of power electronic systems", in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, out. 2012, p. 33–44. doi: 10.1109/IECON.2012.6388833.
- [53] G. Klutke, P. C. Kiessler, e M. A. Wortman, "A critical look at the bathtub curve", *IEEE Trans. Rel.*, vol. 52, n° 1, p. 125–129, mar. 2003, doi: 10.1109/TR.2002.804492.
- [54] SILVA, F. L., "ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UMA MICRORREDE COM MÚLTIPLAS UNIDADES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA", *Dissertação (Mestrado)*, 2011. http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/4083/1/tese_2826_DissertacaoMestradoFlavioLopesdaSilva.pdf (acessado 30 de julho de 2020).
- [55] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, e P. Tavner, "Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, n° 11, p. 2734–2752, nov. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2049377.
- [56] U.-M. Choi, F. Blaabjerg, e K.-B. Lee, "Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 5, p. 2517–2533, maio 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2373390.
- [57] K. Ma e F. Blaabjerg, "The Impact of Power Switching Devices on the Thermal Performance of a 10 MW Wind Power NPC Converter", *Energies*, vol. 5, n° 7, p. 2559–2577, jul. 2012, doi: 10.3390/en5072559.
- [58] R. Wu, F. Blaabjerg, H. Wang, M. Liserre, e F. Iannuzzo, "Catastrophic failure and fault-tolerant design of IGBT power electronic converters - an overview", in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, nov. 2013, p. 507–513. doi: 10.1109/IECON.2013.6699187.
- [59] M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco, e M.- Poech, "Fast power cycling test of IGBT modules in traction application", in *Proceedings of Second*

International Conference on Power Electronics and Drive Systems, maio 1997, vol. 1, p. 425–430 vol.1. doi: 10.1109/PEDS.1997.618742.

[60] M. Ciappa, “Selected failure mechanisms of modern power modules”, *Microelectronics Reliability*, vol. 42, n° 4–5, p. 653–667, abr. 2002, doi: 10.1016/S0026-2714(02)00042-2.

[61] M. Li *et al.*, “Overvoltage protection of high power IGBTs in wind power converters under short circuit”, in *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, maio 2009, p. 2288–2290. doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157785.

[62] X. Huang, W. Chang, e T. Q. Zheng, “Study of the protection and driving characteristics for high voltage high power IGBT modules used in traction convertor”, in *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, jun. 2015, p. 1330–1334. doi: 10.1109/ICIEA.2015.7334314.

[63] M. B. Martins, F. D. de Oliveira, A. E. A. de Araújo, e B. de J. C. Filho, “Proteção de conversores de frequência em sistemas não aterrados com faltas fase-terra intermitentes”, in *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, nov. 2010, p. 1–6. doi: 10.1109/INDUSCON.2010.5739989.

[64] J. He e N. A. O. Demerdash, “Diagnosis of open-circuit switch faults in multilevel active-NPC (ANPC) inverters”, in *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, jun. 2014, p. 1–6. doi: 10.1109/ITEC.2014.6861829.

[65] H. Oh, B. Han, P. McCluskey, C. Han, e B. D. Youn, “Physics-of-Failure, Condition Monitoring, and Prognostics of Insulated Gate Bipolar Transistor Modules: A Review”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 5, p. 2413–2426, maio 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2346485.

[66] I. F. Kovačević, U. Drogenik, e J. W. Kolar, “New physical model for lifetime estimation of power modules”, in *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -*, jun. 2010, p. 2106–2114. doi: 10.1109/IPEC.2010.5543755.

[67] L. J. Ladani, “Reliability estimation for large-area solder joints using explicit modeling of damage”, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 8, n° 2, p. 375–386, jun. 2008, doi: 10.1109/TDMR.2008.919594.

[68] L. Yang, P. A. Agyakwa, e C. M. Johnson, “Physics-of-Failure Lifetime Prediction Models for Wire Bond Interconnects in Power Electronic Modules”, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 13, n° 1, p. 9–17, mar. 2013, doi: 10.1109/TDMR.2012.2235836.

[69] *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-34282-3.

[70] “Load-cycling capability of HiPak_5SYA 2043-04.pdf”. Acessado: 11 de fevereiro de 2021. [Online]. Disponível em: https://library.e.abb.com/public/1f4fb71e0af3356883257c8d00443ca1/Load-cycling%20capability%20of%20HiPak_5SYA%202043-04.pdf

[71] M. A. Masrur, “Penalty for Fuel Economy— System Level Perspectives on the Reliability of Hybrid Electric Vehicles During Normal and Graceful Degradation Operation”, *IEEE Systems Journal*, vol. 2, n° 4, p. 476–483, dez. 2008, doi: 10.1109/JSYST.2008.2005714.

[72] J. Jones e J. Hayes, “Estimation of system reliability using a ‘non-constant failure rate’ model”, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 50, n° 3, p. 286–288, set. 2001, doi: 10.1109/24.974125.

[73] W. Kuo e M. J. Zuo, *Optimal reliability modeling: principles and applications*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2003.

[74] P. Wikstrom, L. A. Terens, e H. Kobi, “Reliability, availability, and maintainability of high-power variable-speed drive systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, n° 1, p. 231–241, jan. 2000, doi: 10.1109/28.821821.

[75] J. W. Harms, “Revision of MIL-HDBK-217, Reliability Prediction of Electronic Equipment”, in *2010 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, jan. 2010, p. 1–3. doi: 10.1109/RAMS.2010.5448046.

[76] A. T. Bryant, P. A. Mawby, P. R. Palmer, E. Santi, e J. L. Hudgins, “Exploration of Power Device Reliability using Compact Device Models and Fast Electro-Thermal Simulation”, in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, out. 2006, vol. 3, p. 1465–1472. doi: 10.1109/IAS.2006.256723.

[77] H. D. Lambilly e H. O. Keser, “Failure analysis of power modules: a look at the packaging and reliability of large IGBTs”, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 16, n° 4, p. 412–417, jun. 1993, doi: 10.1109/33.237930.

[78] C. Bailey, T. Tilford, e H. Lu, “Reliability Analysis for Power Electronics Modules”, in *2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, maio 2007, p. 12–17. doi: 10.1109/ISSE.2007.4432813.

[79] S. S. Smater e A. D. Domínguez-García, “A unified framework for reliability assessment of wind energy conversion systems”, in *IEEE PES General Meeting*, jul. 2010, p. 1–4. doi: 10.1109/PES.2010.5589742.

[80] W. Ying, K. Jinsong, Z. Ye, J. Shiyi, e H. Dabing, “Study of reliability and accelerated life test of electric drive system”, in *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, maio 2009, p. 1060–1064. doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157542.

[81] D. A. Murdock, J. E. Ramos, J. J. Connors, e R. D. Lorenz, “Active thermal control of power electronics modules”, in *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, out. 2003, vol. 3, p. 1511–1515 vol.3. doi: 10.1109/IAS.2003.1257756.

[82] S. Li e L. Xu, “Strategies of fault tolerant operation for three-level PWM inverters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, n° 4, p. 933–940, jul. 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.876867.

[83] J.-J. Park, T.-J. Kim, e D.-S. Hyun, “Study of neutral point potential variation for three-level NPC inverter under fault condition”, in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, nov. 2008, p. 983–988. doi: 10.1109/IECON.2008.4758087.

[84] J.-C. Lee, T.-J. Kim, D.-W. Kang, e D.-S. Hyun, “A control method for improvement of reliability in fault tolerant NPC inverter system”, in *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, jun. 2006, p. 1–5. doi: 10.1109/pesc.2006.1711954.

[85] A. L. Reibman e M. Veeraraghavan, “Reliability modeling: an overview for system designers”, *Computer*, vol. 24, n° 4, p. 49–57, abr. 1991, doi: 10.1109/2.76262.

- [86] F. Chan e H. Calleja, “Design Strategy to Optimize the Reliability of Grid-Connected PV Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n° 11, p. 4465–4472, nov. 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.928100.
- [87] M. Pecht e W.-C. Kang, “A critique of Mil-Hdbk-217E reliability prediction methods”, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 37, n° 5, p. 453–457, dez. 1988, doi: 10.1109/24.9859.
- [88] R. V. White e F. M. Miles, “Principles of fault tolerance”, in *Proceedings of Applied Power Electronics Conference. APEC '96*, mar. 1996, vol. 1, p. 18–25 vol.1. doi: 10.1109/APEC.1996.500416.
- [89] O. Wallmark, L. Harnefors, e O. Carlson, “Control Algorithms for a Fault-Tolerant PMSM Drive”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, n° 4, p. 1973–1980, ago. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.895076.
- [90] S. Wei, B. Wu, F. Li, e X. Sun, “Control method for cascaded H-bridge multilevel inverter with faulty power cells”, in *Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03.*, fev. 2003, vol. 1, p. 261–267 vol.1. doi: 10.1109/APEC.2003.1179224.
- [91] Y. Zang, X. Wang, B. Xu, e J. Liu, “Control Method for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Failures”, in *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, jun. 2006, vol. 2, p. 8462–8466. doi: 10.1109/WCICA.2006.1713629.
- [92] G.-T. Park, T.-J. Kim, D.-W. Kang, e D.-S. Hyun, “Control method of NPC inverter for continuous operation under one phase fault condition”, in *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting.*, out. 2004, vol. 4, p. 2188–2193 vol.4. doi: 10.1109/IAS.2004.1348780.
- [93] Azevedo, G. M. de S., “Controle e Operação de Conversores em Microrredes”, *UFPE*, p. 173, 2011.
- [94] J. Li, A. Q. Huang, S. Bhattacharya, e G. Tan, “Three-Level Active Neutral-Point-Clamped (ANPC) Converter with Fault Tolerant Ability”, in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, fev. 2009, p. 840–845. doi: 10.1109/APEC.2009.4802759.

[95] W. Song e A. Q. Huang, “Fault-Tolerant Design and Control Strategy for Cascaded H-Bridge Multilevel Converter-Based STATCOM”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, n° 8, p. 2700–2708, ago. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2036019.

[96] M. A. Parker, C. Ng, e L. Ran, “Fault-Tolerant Control for a Modular Generator–Converter Scheme for Direct-Drive Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 1, p. 305–315, jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2045318.

[97] A. B. Maish *et al.*, “Photovoltaic system reliability”, in *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997*, set. 1997, p. 1049–1054. doi: 10.1109/PVSC.1997.654269.

[98] C. Rodriguez e G. A. J. Amaratunga, “Long-Lifetime Power Inverter for Photovoltaic AC Modules”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, n° 7, p. 2593–2601, jul. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.922401.

[99] C. Singh and R. Billinton, “Dr Singh’s Webpage - System Reliability Modelling and Evaluation”. <https://people.engr.tamu.edu/c-singh/sysreliability/index.html> (acessado 8 de julho de 2021).

[100] P. Jirutitijaroen, “Power System Reliability”. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-84996-232-2_8.pdf (acessado 8 de julho de 2021).

[101] F. Chan e H. Calleja, “Reliability Estimation of Three Single-Phase Topologies in Grid-Connected PV Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n° 7, p. 2683–2689, jul. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2060459.

[102] “Department of US Defense, MIL-HDBK-217F Notice 2, Military Handbook-Reliability Prediction of Electronic Equipment, Washington, DC, 1995.”

[103] “Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion, 1996.” Acessado: 8 de julho de 2021. [Online]. Disponível em: https://infostore.saiglobal.com/preview/258811600569.pdf?sku=855874_SAIG_NSAI_NSAI_2036039

[104] M. Begovic, A. Pregelj, e A. Rohatgj, “Four-year performance assessment of the 342 kW PV system at Georgia Tech”, in *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*, set. 2000, p. 1575–1578. doi: 10.1109/PVSC.2000.916198.

[105] “H. Laukamp, Reliability Study of Grid-Connected PV Systems: Field Experience and Recommended Design Practice, IEA Photovolt. Power Syst. Program., 2002.” Acessado: 8 de julho de 2021. [Online]. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/rep7_08.pdf

[106] C. Hillman, “Physics of Failure Prediction for Electronic Components and Systems”, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.34100.45441.

[107] L. Umanand, “Power Electronics: Essentials and Applications”, p. 948.

[108] X. Perpina, X. Jorda, M. Vellvehi, J. Rebollo, e M. Mermet-Guyennet, “Long-Term Reliability of Railway Power Inverters Cooled by Heat-Pipe-Based Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, nº 7, p. 2662–2672, jul. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2087298.

[109] S. Canada, L. Moore, e H. Post, “Off-grid hybrid systems - Maintenance costs”, out. 2003.

[110] ADMINISTRADOR, “Investimento em locação de usina fotovoltaica na GD: contexto”, *Ecoa Energias Renováveis*, 10 de fevereiro de 2021. <https://www.ecoaenergias.com.br/2021/02/10/investimento-locacao-usina-fotovoltaica/> (acessado 27 de setembro de 2021).