

Desenvolvimento de Dispositivo para Teste de Chaveamento de Módulo IGBT SKIIP Tipo GD da Marca Semikron

Francisco José Sombra Júnior
Eng. Elétrica – Centro de Engenharias
Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)
Mossoró, Brasil
fjsombrajunior@yahoo.com.br

Idalmir de Souza Queiroz Júnior
Departamento de Engenharia e Tecnologia – DET
Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA)
Mossoró, Brasil
idalmir@ufersa.edu.br

Resumo— O presente trabalho tem por objetivo realizar o estudo concernentes à manutenção dos conversores de energia, em especial, os inversores aplicados na geração eólica, com foco no módulo de IGBT tipo GD da marca *Semikron*. O referido estudo foi realizado em campo, através de um trabalho prático nas dependências da área de conserto de um centro de apoio à pequenas manutenções de componentes da geração eólica situado no estado do Ceará. Nesse sentido, os estudos foram norteados com base nos equipamentos que retornaram sem conserto da assistência técnica, visto que os mesmos já seriam descartados. Primeiramente, foi realizado um estudo para o entendimento das rotinas de manutenção dos conversores eólicos, para a partir de então, traçar as medidas aplicáveis para o desenvolvimento do dispositivo de teste do módulo de IGBT. Ainda sobre os estudos, pode-se afirmar que os mesmos se conduziram com relação à eletrônica de potência e eletrônica digital, visto que o referido dispositivo foi desenvolvido baseado em um contador síncrono de três bits. Após o desenvolvimento e implementação do equipamento de teste, o mesmo foi submetido à vários ensaios de chaveamento sem carga, e logo após, com carga leve auxiliada por uma máquina de solda inversora, atestando-o de forma positiva seus resultados com relação ao objetivo deste trabalho.

Palavras-chave—IGBT, Contador Síncrono, Inversor Eólico, Flip-flop, Energia Eólica.

I. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o desenvolvimento sustentável tem funcionado como estímulo na produção de novas fontes de energia. No cenário nacional e internacional, a demanda por novas fontes de energia tem atraído cada vez mais a atenção de investidores, através de incentivos fiscais, em conjunto com iniciativas governamentais. Aliado a isso, os avanços na área de tecnologia de materiais também favorecem com a redução de custos, promovendo a participação das fontes de energia alternativas nas principais matrizes energéticas mundiais. Ainda nesse cenário, a energia eólica tem se tornado a fonte mais atraente devido ao seu elevado retorno financeiro [1].

Segundo [2], o Brasil, em aproximadamente uma década, conseguiu incluir na sua matriz energética a fonte eólica com significativa participação. Até o início de 2018 a participação dessa matriz era de 8,01%, valor superior ao ano 2010 na qual foi de 0,4%.

Existem diversos fatores que fazem a produção de energia elétrica ser interrompida em uma turbina eólica, tais quais: paradas programadas de manutenção, falha de equipamentos e paradas de geração por questões de segurança, principalmente em função de incidentes nas linhas de transmissão associadas ao parque eólico. Portanto, paralelamente à questão da intermitência dos ventos, os fatores citados anteriormente também contribuem no sentido de que um parque eólico não entregue, num determinado intervalo de tempo, a energia que seria possível entregar no cenário ideal [3].

Nesse sentido, o estudo sobre meios para realizar testes e manutenções nos equipamentos faz-se bastante proveitoso, em especial o inversor eólico, visto que tais medidas podem contribuir com o aumento de componentes consertados no estoque, bem como diminuir o tempo parado por falta de equipamento, aumentando assim, a taxa de disponibilidade, que se apresenta como um dos indicadores mais importantes para as empresas que prestam serviços de operação e manutenção.

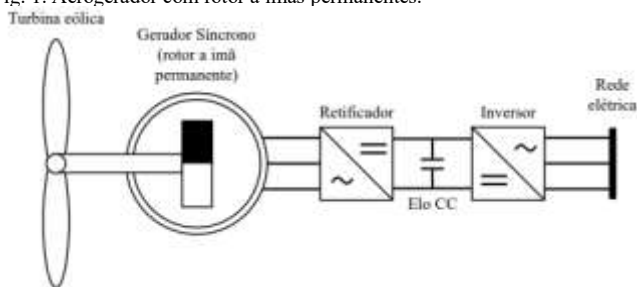
II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Gerador Eólico

Com a evolução tecnológica e o aumento do número de centrais eólicas operando conectadas a rede elétrica, houve um avanço tecnológico nesses equipamentos, o que marcou pela disseminação de diferentes topologias de geração [1], dentre as quais pode-se destacar as máquinas síncronas e assíncronas, com suas inúmeras configurações e arranjos.

Conforme [4], a possibilidade de construção do estator em anel e com muitos polos (gerador multipolos), esta máquina pode trabalhar com baixas velocidades, compatíveis com as da turbina eólica. Isso viabiliza a conexão da turbina diretamente ao gerador, fato este que se constitui numa crescente tendência para arranjos de aerogeradores de grande potência. Essa característica é muito vantajosa, pois elimina a utilização da caixa de velocidade. A Fig. 1 denota o diagrama referente ao gerador síncrono de ímãs permanentes.

Fig. 1. Aerogerador com rotor a ímãs permanentes.



Fonte: [4].

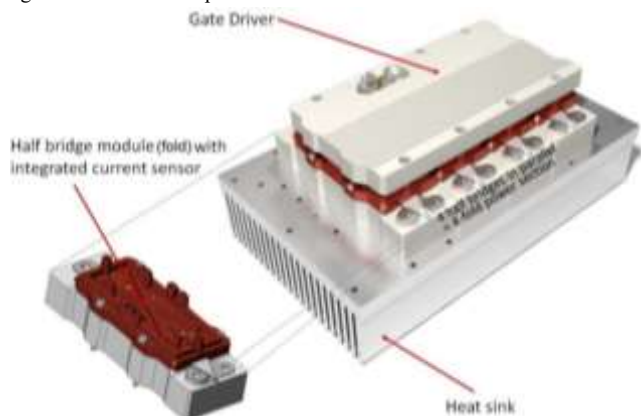
Ainda segundo [1], as máquinas síncronas que utilizam excitação a ímãs permanentes têm suas vantagens com relação às com bobinas de campo, pois simplificam a tecnologia, além de possuir um menor volume.

B. Módulo IGBT Semikron

Presente em sistemas de eletrônica de potência aplicados à geração de energia elétrica, o módulo IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor* - Transistor Bipolar de Porta Isolada da marca *Semikron* é utilizado por vários fabricantes de conversores de energia, seja o inversor ou retificador. Dentre as várias linhas de produtos destinados à eletrônica de potência, o presente estudo será norteado no módulo *SKIIP* tipo GD.

De acordo com [5], o módulo *SKIIP* tipo GD é composto basicamente por três partes, a saber: dissipador de calor, seção de potência e drive de chaveamento. O dissipador de calor é feito em alumínio com galerias internas por onde circula o fluido de refrigeração. A seção de potência é baseada no contato por pressão, possibilitando a diminuição por perdas térmicas, visto que a pressão é exercida na parte superior através parafusos que fixa a seção de potência ao dissipador de calor. Por último, o drive de chaveamento transmite os sinais recebidos por um sistema de controle para os *gates* dos IGBTs internos ao módulo. A Fig. 2 denota as partes supracitadas de um módulo contendo quatro braços.

Fig. 2. Módulo *SKIIP* tipo GD.

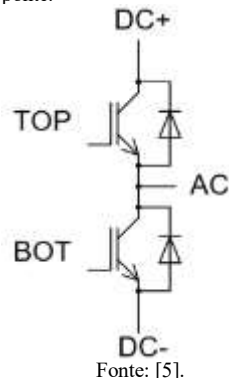


Fonte: [5].

Vale salientar, que a seção de potência do módulo IGBT em estudo consiste em três módulos de meia-ponte controlados separadamente, ou seja, uma meia-ponte por fase. A Fig. 3 indica um módulo de meia-ponte, onde o

IGBT e o diodo conectados entre DC positivo e AC são denominados TOP, e de forma similar, o IGBT e o diodo entre AC e DC negativo são denominados BOT.

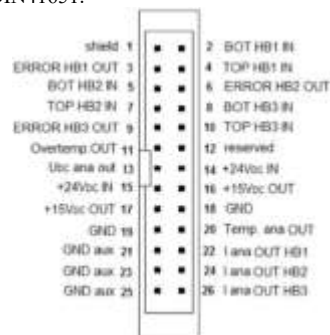
Fig. 3. Módulo de meia-ponte.



Fonte: [5].

A comunicação entre o módulo *SKIIP* tipo GD e o sistema de controle de chaveamento se dá através um cabo flat de vinte e seis vias, cujo conector para o mesmo é do modelo DIN41651, mais especificamente. A Fig. 4 evidencia o conector supramencionado, indicando seus respectivos pinos.

Fig. 4. Conector DIN41651.



Fonte: Adaptada de [5].

Segundo [5], o módulo em estudo possui funções de proteção e supervisão, como: supressão de pulso curto, modelagem do pulso de entrada, proteção contra temperatura excessiva, curto-circuito e sobrecorrente, dentre outras proteções e supervisões. Ressalta-se que todas as funções apresentadas pelo módulo *SKIIP* podem ser exploradas ou não, isso dependerá da complexidade da aplicação do referido equipamento, ficando à cargo do projetista utilizá-los.

Conforme pôde ser observado na Fig. 4, cada pino do referido conector possui finalidade exclusiva, seja para entrada ou saída de sinais. A Tabela I especifica a função de cada um dos pinos. Vale salientar que todas as tensões referidas na Tabela I são tratadas como corrente contínua.

TABELA I. DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES DOS PINOS DO IGBT.

Pino	Descrição
1	Conecta blindagem do cabo quando o mesmo tiver comprimento superior a 3 metros, objetivando a proteção relativa às perturbações eletromagnéticas.
2, 5, 8	Entradas para acionamento do IGBT inferior - BOT, conforme Fig. 2 - do módulo de meia-ponte dos braços 1, 2 e 3, respectivamente.
4, 7, 10	Entradas para acionamento do IGBT superior - TOP, conforme Fig. 2 - do módulo de meia-ponte dos braços

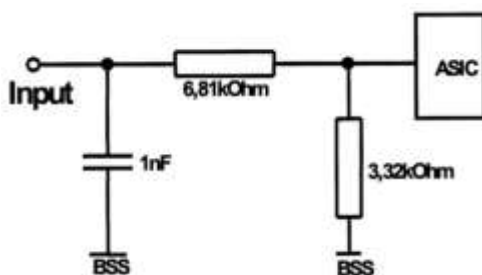
Pino	Descrição
	1, 2 e 3, respectivamente.
3, 6 e 9	Saídas que indicam erro nos respectivos braços, 1, 2 e 3. Ao apresentar condições normais de uso, o sinal de saída será nível lógico baixo, ou seja, algo em torno de 0V, caso contrário, nível lógico alto, 15V.
11	Saída que indica erro de temperatura. Ao exibir nível lógico baixo, o dispositivo apresenta-se sem erro, caso contrário, o nível lógico alto será indicado.
12	Reserva, sem utilização.
13	Saída analógica que monitora a tensão DC de entrada do módulo IGBT.
14 e 15	Entrada de alimentação do módulo em 24V.
16 e 17	Saída de 15V para utilização externa,
18 e 19	GND para sinais digitais.
20	Saída de monitoramento de temperatura interna do módulo, cujo sensor de temperatura localiza-se nas proximidades do dissipador de calor.
21, 23 e 25	GND auxiliar referente às leituras de corrente dos braços 1, 2 e 3, respectivamente.
22, 24 e 26	Saídas analógicas que indicam a corrente elétrica que circula na seção de potência do módulo IGBT, aludindo aos braços 1, 2 e 3, respectivamente.

Fonte: Autoria própria, 2022.

As entradas digitais possuem em seus circuitos capacitores para obter alta imunidade a perturbações externas que possam comprometer o funcionamento do módulo. Segundo [5], é obrigatório o uso de circuitos que comutam entre 0V e +15V para desativar e ativar, respectivamente, ou seja, para a ativação do IGBT TOP do braço 1, deve-se aplicar tensão positiva de 15V no terminal 4, de acordo com a Tabela I. De maneira análoga à ativação, acontece o desligamento do IGBT, porém, aplicando um sinal de nível baixo, 0V.

Outro ponto imprescindível relativo às entradas digitais que deve ser observado é quanto a sua interface interna. Como pode ser observado na Fig. 5, existem duas resistências que somam algo em torno de 10k Ω , que ainda segundo [5], um dos testes a serem realizados no referido módulo é a medição dessa resistência equivalente de cada entrada digital, mais especificamente, nos pinos 2, 4, 5, 7, 8 e 10. É oportuno destacar que deve ser utilizado os pinos 18 ou 19, que são GND para entradas digitais, como referência.

Fig. 5. Interface internas das entradas TOP/BOT.



Fonte: [5].

Outro ponto importante a ser destacado é que o módulo SKIIP possui um circuito de intertravamento que impede o acionamento do TOP e BOT dos braços do IGBT ao mesmo tempo, evitando que fechem um curto-circuito interno. O tempo de intertravamento interno é adaptado aos semicondutores de potência, ou seja, é escolhido o menor possível para permitir um ciclo de trabalho alto, garantindo uma margem de segurança contra perdas devido a correntes de cauda

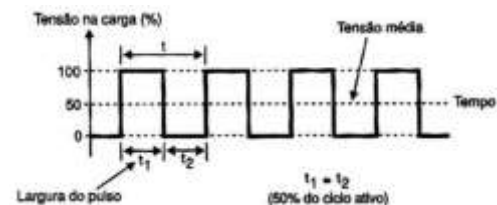
C. Gerador de pulsos PWM

Com a descoberta e evolução dos dispositivos baseados em silício e outros semicondutores, o *PWM – Pulse Width Modulation*, vem se tornando uma técnica bastante empregada em sistemas e dispositivos de eletrônica de potência, visto que essa técnica permite o controle de frequência e tensão.

Esse método de modulação digital que utiliza de pulsos para gerar um nível de tensão média. As duas aplicações mais comuns da técnica é entregar valores variáveis de tensão à carga ou até mesmo modular um sinal através de uma portadora, uma onda quadrada, isto baseado no seu duty-cycle, que é a proporção em que a onda fica em nível alto em relação ao tempo total [6].

Na Fig. 6 pode ser observado um sinal gerado por um *PWM* e seus parâmetros denotando um sinal com *duty-cycle* de 50%. O termo *duty-cycle* refere-se à proporção em que parte do ciclo fica em estado ativo, nível lógico alto.

Fig. 6. Sinal PWM.



Fonte: [6].

D. Eletrônica Digital

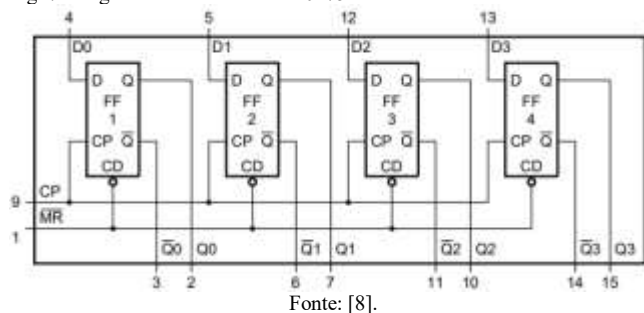
• CI 40175

De acordo com [7], o elemento de memória mais importante é o flip-flop, composto por um conjunto de portas lógicas. Embora uma porta lógica, por si só, não tenha capacidade de armazenamento, algumas podem ser conectadas entre si de modo a permitir o armazenamento de informação. Um elemento de memória pode ser criado aplicando-se o conceito de realimentação. Esta é conseguida conectando-se determinadas saídas de porta de volta às entradas de porta apropriadas. A realimentação é um conceito de engenharia extremamente importante, que tem muitas aplicações na eletrônica. Algumas formas diferentes de arranjo de portas são usadas para produzir flip-flops (FFs).

Dentre as variações existentes de flip-flops tipo D existentes, pode-se destacar o CI 40175, que conforme [8], é um flip-flop tipo D disparado por borda positiva quádrupla com quatro entradas de dados (Dn), entradas comuns de clock (CP), reset mestre assíncrono (MR) e saídas complementares, Q_n e $\overline{Q_n}$. O diagrama funcional pode ser observado na Fig. 7.

É oportuno destacar que o CI 40175 possui uma faixa de tensão de trabalho que varia de 5 a 15V, fato que é bastante útil para o desenvolvimento e implementação de projetos, visto que permite que o circuito trabalhe com poucos níveis de tensão. Outro ponto bastante importante é com relação ao tempo de transição entre a alternância das saídas de níveis alto para baixo. No referido componente esse valor permeia entre 20 a 60 ns, possuindo frequência de chaveamento máxima de 11 a 45MHz, a depender da tensão de trabalho do mesmo, conforme [8].

Fig. 7. Diagrama funcional do CI 40175.

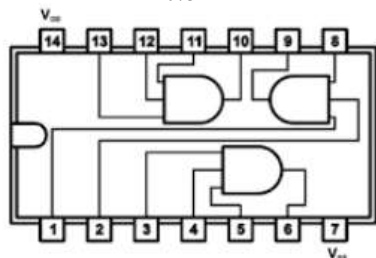


Fonte: [8].

• CI 4073

O CI 4073 é composto por três portas AND com três entradas cada. A lógica AND permite a saída verdadeira apenas quando as três entradas tiverem nível lógico alto simultaneamente. Assim como no CI 40175, o referido CI também possui faixa de tensão de trabalho favorável a projetos, visto que o mesmo permite trabalhar com poucos níveis de tensão no circuito, tornando-o mais compacto, visto que diminui a necessidade de vários reguladores de tensão. A Fig. 8 denota o circuito lógico do componente.

Fig. 8. Diagrama funcional do CI 4073.



Fonte: [9].

III. METODOLOGIA

Com o intuito de sanar um dos problemas recorrentes à manutenção dos conversores de energia, em especial, os inversores aplicados na geração de energia eólica, foi realizado um estudo empenhado em detalhar o funcionamento do referido equipamento, para poder, a partir de então, traçar as medidas para a mitigação de tais dificuldades.

A realização do estudo supracitado foi efetuada através de um trabalho prático nas dependências da área de pequenas manutenções de um centro de apoio situado no estado do Ceará, pertencente à empresa responsável pelo O&M – Operação e Manutenção.

Durante o andamento do presente trabalho, foram relatadas informações pelos técnicos de campo e responsáveis pelo setor de consertos a respeito da dinâmica das manutenções no referido equipamento. O fluxo de operações referentes à manutenção obedece a seguinte ordem:

- O equipamento permanece em operação até que ocorra alguma intercorrência que seja necessária sua substituição;

- Caso o equipamento entre em falha, o mesmo é substituído e enviado para a assistência técnica do fabricante;
- Havendo a possibilidade de conserto, assim o faz, caso contrário, o mesmo é reenviado para o parque eólico de origem para ser descartado de acordo com as políticas da empresa.

Nesse sentido, os estudos realizados neste trabalho foram norteados com base nos equipamentos que retornaram sem conserto da assistência técnica, seguindo a ordem cronológica descrita abaixo:

- Análise sobre os defeitos do inversor eólico;
- Desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no diagnóstico do equipamento;
- Levantamento do material necessário;
- Montagem do equipamento para teste.

A. Análise dos Defeitos Ocorridos Nos Inversores

A análise dos defeitos ocorridos nos inversores iniciou-se através da leitura dos laudos técnicos emitidos pela assistência técnica. Conforme tais documentos, os inversores que apresentavam qualquer sinal de curto-circuito do *link DC*, capacitores, resistores ou qualquer outro componente, os equipamentos já eram avaliados como inviáveis para conserto, sob a alegação de que tal curto-circuito poderia ter ocasionado algum dano ao módulo IGBT.

As Fig. 9 e 10 denotam um inversor com suas tampas laterais abertas indicando alguns componentes danificados que ocasionaram seu descarte, segundo a assistência técnica.

Fig. 9. Inversor com capacitores do *BUS AC* danificados.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Fig. 10. Inversor com curto-circuito no *LINK DC*.



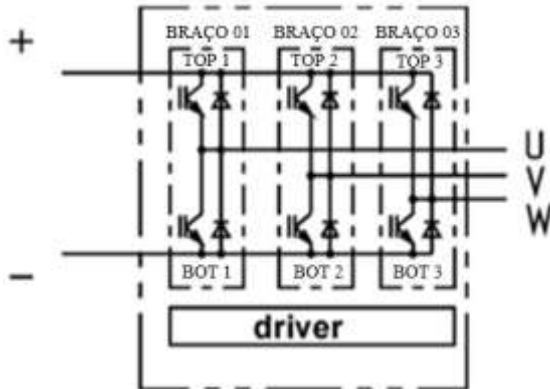
Fonte: Autoria própria, 2022.

Tais informações validou a necessidade de desenvolver um dispositivo de teste para analisar o estado de funcionamento do módulo IGBT, visto que é um dos componentes mais onerosos do equipamento, além de existir certa dificuldade de sua aquisição devido à restrição de matéria prima por parte do fabricante, principalmente no período pós-pandemia.

B. Desenvolvimento do Teste do Módulo IGBT

O desenvolvimento do teste do módulo de IGBT foi realizado tendo como base apenas o sistema de chaveamento dos IGBTs. De acordo com [5], o módulo SKIIP tipo GD possui três braços de IGBTs comandados individualmente. A Fig. 11 evidencia o diagrama de eletrônica de potência que foi utilizado para elaborar a sequência de chaveamento conforme a necessidade, além de informar algumas nomenclaturas utilizadas pelo fabricante referente aos IGBTs internos do módulo.

Fig. 11. Diagrama Módulo IGBT.



Fonte: Adaptado de [5].

Ainda de acordo com [5], as chaves superiores dos braços do módulo IGBT - TOP 1, TOP 2 e TOP 3 - não podem ser fechadas em relação às suas respectivas complementares, BOT 1, BOT 2 e BOT 3, simultaneamente, pois é evidente a ocorrência de um curto-circuito no barramento DC.

É oportuno frisar que o módulo IGBT objeto deste trabalho pode funcionar com as mais diversas formas de modulação de pulsos, por exemplo, *Space Vector*, *SPWM*, dentre outras opções disponíveis, ficando a cargo na necessidade do projeto qual tipo escolher. Mesmo com todas as opções de diferentes formas de modulação, todas elas têm uma coisa em comum: não podem acionar os dois IGBTs do mesmo braço simultaneamente, sob a pena de causar curto-circuito e danificar todo o equipamento.

A partir das condições supramencionadas, foi desenvolvido um contador síncrono de três bits para realizar a sequência de chaveamento, obedecendo a lógica de intertravamento entre IGBTs do mesmo braço. A TABELA II denota a sequência do contador síncrono, onde o estágio representa a sequência modificada a cada pulso de clock.

TABELA II. SEQUÊNCIA BINÁRIA PARA O CONTADOR SÍNCRONO.

Estágio	Ligado ON	Desligado OFF	Sequência binária ^a
1	Top 1, Bot 2, Bot 3	Bot 1, Top 2 e Top 3	100
2	Top 2, Bot 1, Bot 3	Bot 2, Top 1 e Top 3	010
3	Top 3, Bot 1, Bot 2	Bot 3, Top 1 e Top 2	001

^a Sequência binária utilizada para o contador síncrono conforme o estado ON/OFF das chaves TOP.

O contador síncrono foi projetado para obedecer a sequência binária descrita na TABELA II. Para tal, os passos de 1 a 5 foram seguidos, seguindo a metodologia indicada por [7].

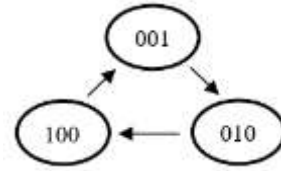
Passo 1: Determinar o número de bits e a sequência de contagem desejada.

O número de bits escolhido foi três, visto que está sendo utilizado um bit por braço do módulo IGBT, considerando que o presente trabalho está sendo realizado à cerca de um módulo com três braços de IGBT. A sequência utilizada é a mesma descrita na sequência binária da TABELA II.

Passo 2: Desenhar o diagrama de transição de estado.

A sequência pode ser observada na Fig. 12. Vale salientar que a referida sequência se manterá até que o ciclo seja interrompido.

Fig. 12. Sequência de transição de estado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Passo 3: Montar tabela com todas as transições atuais, futuras e entradas necessárias para o acionamento do flip-flop. Para o flip-flop tipo D, as entradas de controle são as mesmas do estado futuro.

TABELA III. SEQUÊNCIAS E TRANSIÇÕES PARA CONTROLE DO FLIP-FLOP.

Linha	Estado atual			Estado futuro			Entradas de controle		
	A	B	C	A	B	C	D _A	D _B	D _C
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	1	0	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0	1	0	0
4	0	1	1	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	1	0	0	1
6	1	0	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria, 2022.

Passo 4: Gerar as expressões lógicas a partir da TABELA III, de sequências e transições, referente às entradas de controle. Tais expressões foram obtidas através da implementação do mapa de Karnaugh com 3 variáveis para cada entrada de controle.

A TABELA IV indica os mapas de Karnaugh das entradas D_A, D_B e D_C, respectivamente.

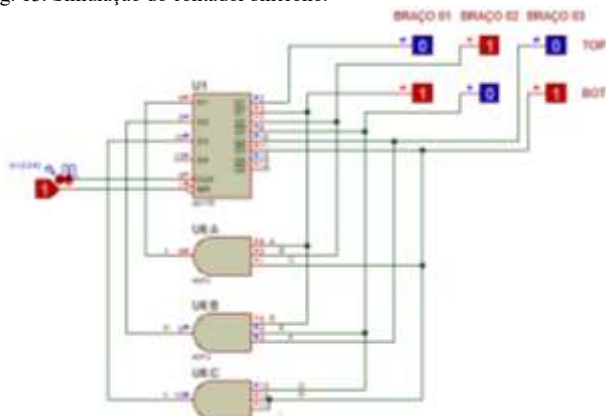
TABELA IV. MAPAS DE KARNAUGH DAS ENTRADAS DE CONTROLE.

D _A			D _B			D _C		
	$\bar{A}$	A		$\bar{A}$	A		$\bar{A}$	A
$\bar{B}\bar{C}$	0	0	$\bar{B}\bar{C}$	0	0	$\bar{B}\bar{C}$	1	1
$\bar{B}C$	0	0	$\bar{B}C$	1	0	$\bar{B}C$	0	0
CB	0	0	CB	0	0	CB	0	0
BC	1	0	BC	0	0	BC	0	0
D _A = $\bar{A}BC$			D _B = $\bar{A}BC$			D _C = $\bar{B}C$		

Fonte: Autoria própria, 2022.

Passo 5: Implementação dos resultados obtidos na TABELA IV em um software de simulação. A Fig. 13 denota a simulação do circuito contador síncrono de três bits. É válido salientar que a cada pulso de clock na referida simulação a sequência binária indicada na TABELA II se cumpriu, consolidando-se assim, a segurança referente ao intertravamento do projeto.

Fig. 13. Simulação do contador síncrono.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Após a simulação do contador síncrono em questão, realizou-se um levantamento de todos os componentes necessário para a implementação do circuito. À priori, optou-se por utilizar uma *protoboard* para a montagem dos componentes, visto que por sua facilidade em manusear as pequenas peças eletrônicas, apresentou-se como excelente opção.

Na seção a seguir, a ênfase foi pautada no levantamento de todos os componentes necessário bem como seus custos, pois é de grande importância tê-lo contabilizados para possível estudo de viabilidade financeira referente ao desenvolvimento do equipamento.

C. Relação de materiais necessários

A TABELA V denota a lista de todos os componentes utilizados neste projeto, sendo evidenciado a quantidade, nome e valor monetário.

TABELA V. LISTA DE MATERIAIS UTILIZADOS

Lista de materiais		
Quantidade	Componentes	Valor (R\$)
01	Protoboard	35,00
01	CI – 40175	5,00
01	CI – 4073	3,00
11	Led 5mm	11,00
01	Regulador de tensão 7812	3,00

11	Resistores	11,00
02	Botão I/O	8,00
02	Botão sem retenção	8,00
01	Capacitor	2,00
01	Gerador de pulsos	100,00
01	Maleta para montagem	21,00
01	Fonte 24Vcc	40,00
Total		R\$ 247,00

Fonte: Autoria própria, 2022.

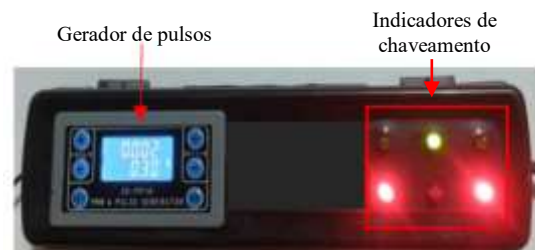
Vale salientar que os valores inseridos na TABELA V têm papel apenas informativo com relação aos custos do projeto, visto que alguns componentes foram conseguidos de doação, e outros, já havia nas dependências área de conserto da empresa onde foi realizado este estudo.

D. Montagem do equipamento para teste

Decorridos todos os testes relacionados ao chaveamento realizado via *software* de simulação, chegou-se à necessidade de montar o circuito físico. Para isso, iniciou-se com o levantamento de todos componentes necessário para o projeto, conforme TABELA V, que evidencia os tipos, quantidades e custos dos mesmos.

No primeiro momento foi dado ênfase ao circuito indicado na Fig. 13, apenas com o gerador de pulsos e com os CI's que compreendem à lógica de chaveamento. Com relação ao gerador de pulso, foi preferível utilizar um componente existente pronto no mercado, visto que o mesmo fornece funções como variação do *duty-cycle* e frequência que percorre uma faixa entre 1 e 150kHz, além de outras funções que não foram utilizadas neste projeto. Outros pontos fundamentais para a escolha desse gerador de pulso foi o fato da otimização do espaço na protoboard, possibilidade de variação das frequências de trabalho de forma simples e direta, além do mesmo já estar à disposição para uso. A Fig. 14 indica a primeira montagem do equipamento de teste.

Fig. 14. Primeiro equipamento de teste de chaveamento.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Após a montagem, o equipamento de teste foi ensaiado em um módulo de IGBT para atestar seu funcionamento. A Fig. 15 mostra uma fonte de bancada com duas saídas, um multímetro com escala de medição de frequência em Hz e o dispositivo desenvolvido neste trabalho, evidenciando o referido ensaio.

A saída de 24V da fonte de bancada foi conectada ao módulo IGBT para sua devida alimentação, e a de 12V, alimentação do dispositivo de teste. Todas as conexões

foram realizadas de acordo com as especificações do módulo IGBT presentes em [5], e evidenciadas neste trabalho, mais precisamente na TABELA I.

Fig. 15. Ensaio do teste de chaveamento.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Como pode ser observado na Fig. 15, o multímetro indica a escala de frequência com um valor de 2750Hz. Essa leitura de frequência foi obtida ao simular a conexão do módulo IGBT ao sistema de potência. Para isso, foi alimentado as entradas DC do módulo IGBT com uma fonte de tensão contínua de 24V e, conforme a frequência de chaveamento do dispositivo de teste, a leitura de frequência foi realizada no lado AC no módulo. Esse teste foi efetuado em cada um dos braços do IGBT, atestando, assim, que o drive de chaveamento e a seção de potência do módulo de estavam funcionando.

Ainda sobre a Fig. 15, o gerador de pulso indica a frequência de 8337Hz, responsável pelo clock do flip-flop. É oportuno destacar, que como o contador de três bits realiza uma sequência com três valores binários (001 – 010 – 100), essa frequência indicada pelo gerador de pulso é dividida por três, visto que o chaveamento do módulo é realizado pelas três saídas utilizadas do flip-flop.

Ao realizar esse teste, descobriu-se que o gerador de pulsos possui uma pequena discrepância entre os valores de frequência solicitados e medidos, pois para se obter 2750Hz em cada braço do IGBT, a frequência no gerador de pulso deveria ser de 8250Hz, fato que não aconteceu. Apesar dessa pequena diferença, o teste não foi comprometido. Para a comprovação que essa pequena divergência do gerador de pulso acontece no próprio gerador e não por falha no circuito referente ao contador síncrono, foi medida a frequência de chaveamento na saída do gerador, e essa pequena alteração se manteve.

Realizado a primeira etapa do teste, e declarado o funcionamento conforme esperado, o sistema foi implementado com mais alguns LED's de mensagens de erro, conector tipo DIN41651 conforme a Fig. 4, maleta de montagem mais adequada, dentre outras melhorias. A Fig. 16 evidencia a versão final desenvolvida neste trabalho.

Fig. 16. Equipamento de teste finalizado.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Como pôde ser observado na Fig. 16, existem alguns números no dispositivo, sendo que cada um deles tem uma função conforme as indicações abaixo.

- 1 – Chave liga / desliga o equipamento;
- 2 – Botões de teste para os LEDs 3, 4 e 6. O primeiro botão refere-se ao teste dos LEDs que indicam sinais de erro, 4 e 6. Já o segundo botão, 3, indica os LEDs relacionados ao chaveamento do módulo;
- 5 – Chave liga / desliga responsável por alimentar o drive de chaveamento do IGBT com 24V;
- 7 – Conector para o cabo flat;
- 8 – Terminais para leitura de tensão referente à temperatura, corrente elétrica dos braços do IGBT, tensão de barramento, dentre outras funções. Vale destacar que no momento elas não foram utilizadas nos ensaios deste trabalho.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em razão dos estudos, desenvolvimento e ensaios do sistema de teste de chaveamento do módulo de IGBT tipo GD da marca *Semikron*, tornou-se possível analisar a sua aplicação prática para a realização de possíveis consertos dos inversores de energia elétrica de alta potência empregados na geração de eletricidade provenientes dos ventos. Nesse sentido, as seguintes seções apresentam os resultados dos testes em bancada do módulo de IGBT com a utilização com a utilização do osciloscópio e a realização dos testes em um inversor eólico, conforme o objetivo deste trabalho.

A. Teste de bancada do módulo IGBT

Conforme supramencionado, o teste de bancada foi realizado com a utilização de um osciloscópio da marca *FLUKE*, modelo *190-104 SCOPEMETER* quatro canais. Esse modelo de osciloscópio é indicado para a utilização em campo, porém, o mesmo solicitado para o referido teste, sendo bastante eficiente para a análise.

Vale ressaltar que a utilização do osciloscópio teve como objetivo verificar os sinais de chaveamento na saída AC do módulo IGBT, explorando o comportamento como a existência de sobreposição de sinais. A Fig. 17 denota o teste realizado em bancada. Vale salientar que na referida figura está sendo utilizado um soprador térmico para a análise do comportamento do módulo com relação ao aumento de

temperatura, porém, assuntos referidos a variações térmicas estão fora do escopo deste trabalho.

Fig. 17. Teste de bancada com osciloscópio.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Ainda sobre o ensaio realizado com o osciloscópio, a Fig. 18 evidencia de forma nítida que não houve sobreposição de sinais. Esse resultado já era esperado, visto que o tempo morto existente entre as transições do chaveamento do flip-flop foram suficientes para o drive não entrar em modo de proteção.

Fig. 18. Análise dos sinais de saída AC.



Fonte: Autoria própria, 2022.

B. Teste do módulo IGBT no inversor

O teste em questão foi realizado no próprio inversor eólico, possibilitando uma análise mais consistente para o diagnóstico do mesmo. A Fig. 19 indica o dispositivo de teste conectado ao inversor para a análise do seu módulo de IGBT.

No primeiro momento, foi realizado o ensaio de chaveamento na frequência de trabalho do módulo, que é de 8.250 Hz. Como pode ser observada na referida figura, os teste que indicam erro permaneceram apagados, denotando que em nenhum dos braços do IGBT possui alguma falha que possa ocasionar o descarte do equipamento.

Fig. 19. Teste do módulo IGBT no inversor.



Fonte: Autoria própria, 2022.

No segundo momento, foi realizado um teste em cada braço do IGBT com o auxílio de uma máquina de solda inversora. Por se tratar de um equipamento de conversor eletrônico, a mesma induz uma tensão de saída contínua e elevado nível de corrente, apresentando-se como alternativa viável para testar o referido módulo com passagem de corrente elétrica em valores consideráveis. Para possibilitar o entendimento dos pontos envolvidos no ensaio, foram utilizados números de 1 a 5 para a identificação com componentes. A Fig. 20 denota o referido teste.

Fig. 20. Teste do módulo com máquina de solda inversora.



Fonte: Autoria própria, 2022.

O ensaio realizado denotado pela Fig. 20 evidencia a máquina de solda em 1, conectada ao barramento CC do módulo IGBT, denotado por 2. O cabo positivo da máquina foi conectado ao terminal positivo do módulo e está envolto por um alicate amperímetro conforme o número 3. Já o cabo negativo da mesma está conectado ao barramento negativo do módulo. Vale destacar que no terminal negativo da máquina foi derivado para a placa de metal indicada pelo número 4 da referida Figura, pois o mesmo teve a função de

aterramento. Para completar o circuito, um cabo foi conectado ao terminal AC do módulo IGBT, e sua outra extremidade, um eletrodo para soldar, conforme indica o número 5 da Fig. 20.

Após todas as conexões descritas no parágrafo precedente, foi realizado o teste com carga em cada um dos três braços de módulo IGBT.

Primeiramente, foi realizado o ensaio com o dispositivo de teste desligado com o intuito de se certificar que a seção de potência do módulo IGBT não iria conduzir a corrente injetada pela máquina de solda, fato este que ocorreu conforme o esperado, ou seja, não houve fluxo de corrente elétrica quando o dispositivo de teste não estava chaveando. Logo após o primeiro ensaio, foi acionado o chaveamento e a corrente elétrica fluiu pela seção de potência, havendo o fechamento do arco elétrico entre o eletrodo de solda indicado pelo cabo 5 da Fig. 20 e o terra, placa de metal indicada por 4 da mesma Figura.

É oportuno destacar que devido aos meios desenvolvidos para esses ensaios, os testes aqui realizado não puderam ser realizados por um período contínuo, sendo apenas o tempo necessário para a fusão do eletrodo de solda. Mesmo assim, foi conseguido registrar picos de corrente elétrica superiores a 125 amperes para cada braço ensaiado, conforme mostra na Fig. 21.

Fig. 21. Pico de corrente elétrica durante os ensaios.



Fonte: Autoria própria, 2022.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para possibilitar o desenvolvimento do presente trabalho, tornou-se necessário, em primeiro plano, compreender o contexto relacionado à dinâmica dos parques eólicos no que se refere à manutenção dos equipamentos, em especial, o inversor. Além disso, o estudo realizado a respeito do tema, pesquisas de campo, conversas com técnicos e responsáveis pela manutenção fizeram total diferença para o aperfeiçoamento da implementação dos testes aqui tratados como objeto de estudo.

Diante do exposto, o presente trabalho conclui-se de forma satisfatória com relação aos resultados alcançados nos ensaios aqui supracitados, visto que os objetivos foram alcançados em parte. Acredita-se que o mesmo contribuirá para novas pesquisas concernentes ao tema deste estudo, pois, com um investimento baixo relativo ao preço de um inversor eólico, pôde-se dar novas alternativas para tratar de problemas como esse, que é a falta de ferramentas para testes de componentes.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar várias melhorias, por exemplo, a implementação do mesmo equipamento de teste utilizando microcontrolador, desenvolvendo um sistema de chaveamento baseado no *SPWM - Sinusoidal Pulse Width Modulation*., além do desenvolvimento de um banco de carga para que o módulo possa ser ensaiado com corrente próxima à nominal, visto que esse sistema propiciará testes como leitura de corrente elétrica e temperatura atingida pelo módulo em teste.

REFERÊNCIAS

- [1] MAIA, Thales Alexandre Carvalho. **Projeto e Construção de um Gerador a Ímãs Permanentes de Fluxo Axial para Turbina Eólica de Pequena Potência**. 2011. 197f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2011.
- [2] M. González, M. Gabriel, M. Aylla, D. Cassimiro, R. Monteiro, M. L. Medeiros, and E. Cavalcanti, “**Operação e Manutenção de Parques Eólicos do Brasil: Desafios e Oportunidades**”, Brazil Windpower Conference and Exhibition. Disponível em < <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2018/09/MARIO-GONZALES.pdf> > Acesso em: 10 nov 2022.
- [3] MELO, Marcelo Silva de Matos. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. 2012. 154f. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [4] BONELLI, Arthur Fernando. **Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica**. 2010. 199f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 2010.
- [5] Datasheet SKiIP 3 V3. **Technical Explanation SKiIP®3 V3**. Disponível em: < www.semikron.com/download >. Acesso em: 05 set 2022.
- [6] GONZAGA, Arthur Simões. **Estudo de Técnicas de Modulação por Largura de Pulso (PWM) Aplicado a Inversores Trifásicos**. 2018. 57f. Monografia (Graduação em Engenharia Eletrônica), Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2018.
- [7] TOCCI, Ronald J. WIDMER, Neal S. MOSS, Gregory L. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações**. 11 ed. São Paulo. Pearson Preitice Hall, 2011.
- [8] Datasheet CI 40175. Disponível em: < https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd40175b.pdf?ts=1668735918495&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F > Acesso em: 01 set 2022.
- [9] Datasheet CI 4073. Disponível em: < https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4081b.pdf?ts=1668676723990&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F > Acesso em: 01 set 2022.