

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIENCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Autor: Bruno Almeida Magalhães

**DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR *INTELLIGENT BYPASS SWITCH* (IBS)
PARA APLICAÇÃO NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

João Monlevade

2017

BRUNO ALMEIDA MAGALHÃES

**DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR *INTELLIGENT BYPASS SWITCH* (IBS)
PARA APLICAÇÃO NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Da Silva;

João Monlevade

2017

M188d Magalhães, Bruno Almeida.
Desenvolvimento do conversor Intelligent Bypass Switch (IBS) para aplicação no Sistema Elétrico de Potência [manuscrito] / Bruno Almeida Magalhães. - 2017.

67f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Eletrônica de potência . 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Energia elétrica - Qualidade. 4. Controle eletrônico. I. Silva, Carlos Henrique da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.31

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ATA DE DEFESA

Aos 06 dias do mês de abril de 2017, às 10:30 horas, no bloco H deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Bruno Almeida Magalhães, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Carlos Henrique Da Silva, Juan Carlos Galvis Manso e Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa.

O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: *Desenvolvimento do conversor Intelligent Bypass Switch (IBS) para aplicação no sistema elétrico de potência*. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do(a) candidato(a), com a nota média 9,23, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Juan Carlos Galvis Manso	9,5
CARLOS HENRIQUE NOGUEIRA DE RESENDE BARBOSA	9,2
(CARLOS) Henrique da Silva	9,0
Média	9,23

João Monlevade, 06 de abril de 2017.

Carlos Henrique da Silva

Professor(a) Orientador(a)

Bruno Almeida Magalhães

Aluno (a)

[Assinatura]

Professor(a) Convidado(a)

Juan Carlos Galvis M.

Professor(a) Convidado(a)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “**DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR *INTELLIGENT BYPASS SWITCH* (IBS) PARA APLICAÇÃO NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA**” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 05 de Abril de 2017.

Bruno Almeida Magalhães
Bruno Almeida Magalhães

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento do conversor estático denominado *Intelligent Bypass Switch* (IBS), cuja aplicação é destinada a microrredes de energia. As microrredes são formadas por fontes de geração renovável e tem a capacidade de operar em modo isolado ou conectado ao sistema elétrico de potência (SEP). Para ambos os modos de operação, é necessário utilizar um sistema de controle que monitora em tempo real os dados elétricos da microrrede e atua reconfigurando a topologia de operação da mesma. Os elementos responsáveis por conectar ou desconectar a microrrede do SEP são as chaves estáticas CA.

O conversor IBS é um protótipo proposto para atuar em microrredes que operam em modo isolado. Esse protótipo é composto por um sistema de controle inteligente capaz de monitorar em tempo real os valores de tensão, corrente e potência da microrrede, e atuar no sistema comandando a abertura ou o fechamento das chaves estáticas CA.

Além disso, o sistema de controle do IBS conta com um algoritmo de identificação de cargas lineares e não-lineares que determina, numa condição de sobrecarga das fontes da microrrede, a carga que deverá ser transferida para a rede elétrica da concessionária (SEP). Outra característica importante no sistema de controle do IBS é a função de detecção do valor zero na tensão e na corrente. Essa função garante o fechamento das chaves estáticas somente no zero de tensão e a abertura apenas no zero de corrente, evitando assim a ocorrência de sobrecorrente e sobretensões no sistema durante a manobra das chaves.

O desenvolvimento do conversor estático IBS ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa realizou-se a modelagem de uma microrrede no *Simulink*TM, onde foi possível validar a técnica de identificação de carga, o comando das chaves estáticas e a operação da lógica de controle do IBS em um ambiente simulado.

A segunda etapa do desenvolvimento do conversor consistiu na montagem do protótipo para realização de ensaios funcionais em laboratório. Nessa fase foram desenvolvidos os circuitos para medição de tensão e corrente, condicionamento de sinal, chaves estáticas CA e a programação da unidade de controle do conversor IBS.

Durante os ensaios em laboratório constatou-se a capacidade do protótipo em comandar a abertura e fechamento das chaves estáticas CA com cargas lineares. Por fim, realizou-se um último teste de operação do IBS onde uma carga linear era comutada entre duas redes não sincronizadas e isoladas, simulando assim a atuação do conversor em uma microrrede que opera em modo isolado.

Palavras-chave: Microrredes, Conversor estático, Chaves estáticas CA, Chaves estáticas de transferência e Identificação de cargas.

ABSTRACT

This work aims to present the development of the static converter called Intelligent Bypass Switch (IBS), whose application is destined to microgrids of energy. The microgrids are formed by renewable generation sources and have the capacity to operate in isolated mode or connected to the power system. For both modes of operation, it is necessary to use a control system that monitors in real time the electrical data of the microgrids and acts by reconfiguring the topology of its operation. The elements responsible for connecting or disconnecting the microgrids from the power system are the static switches AC.

The IBS converter is a prototype proposed to operate in microgrids that operate in isolated mode. This prototype is composed of an intelligent control system capable of monitoring in real time the voltage, current and power values of the microgrids and actuating the system by opening or closing the static switches AC.

In addition, the IBS control system has an algorithm for identifying linear and non-linear loads that determines, in an overload condition of the microgrid sources, the load to be transferred to the power system. Another important feature in the IBS control system is the function of detecting the zero value in voltage and current. This function ensures the closing of the static switches only at the zero voltage value and the opening only at the zero current value, thus avoiding the occurrence of overcurrent and overvoltages in the system during the operation of the static switches.

The development of the IBS static converter occurred in two steps. In the first step the modeling of a microgrid in the *Simulink*[™], where it was possible to validate the load identification technique, the command of the static switches and the operation of the IBS control logic in a simulated environment.

The second step of the converter development consisted in the assembly of the prototype for realization of functional tests in laboratory. In this step the circuits were developed for voltage and current measurement, signal conditioning, static switches AC and the programming of the control unit of the IBS converter.

During the laboratory tests the prototype's ability to control the opening and closing of static switches AC with linear loads was verified. Finally, a final IBS test was performed where a linear load was switched between two non-synchronous and isolated networks, thus simulating the actuation of the converter in a microgrid operating in isolated mode.

Keywords: Microgrids, Static converter, Static switches AC, Static transfer switches and Load identification.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Modelo de arquitetura para uma microrrede.
- Figura 2 - Modelo de microrrede para atendimento a cargas prioritárias.
- Figura 3 - Chave Estática CA na configuração de dois tiristores tipo SCR ligados em antiparalelo.
- Figura 4 - Formas de ondas para uma carga resistiva após a condução da chave estática CA.
- Figura 5 - Análise do disparo da chave estática CA operando com carga indutiva.
- Figura 6 - Chave estática utilizando apenas 1 (um) SCR.
- Figura 7 - Chave estática utilizando 2 (dois) SCRs e com um único circuito de disparo.
- Figura 8 - Esquema .
- Figura 9 - Esquema elétrico simplificado de uma UPS.
- Figura 10 - STS composta por duas chaves estáticas CA.
- Figura 11 - Diagrama geral de conexão do conversor IBS.
- Figura 12 - Circuito interno do conversor IBS.
- Figura 13 - Esquema elétrico de ligação da chave estática CA do conversor IBS.
- Figura 14 - Transdutor de tensão do fabricante LEM: (a) Encapsulamento. (b) Diagrama de conexão.
- Figura 15 - Transdutor de corrente da LEM: (a) Encapsulamento. (b) Diagrama de conexão. (c) Relação de medição utilizada no conversor.
- Figura 16 - Diagrama elétrico da placa de condicionamento de sinal.
- Figura 17 - Comparação entre os sinais de entrada e saída da placa de condicionamento.
- Figura 18 - DSP utilizado no controle de operação do conversor IBS.
- Figura 19 - Disposição dos pinos do circuito integrado (HCPL-3120).
- Figura 20 - Conexões do circuito de gate-driver.
- Figura 21 - Fluxograma da função de identificação do tipo de carga.
- Figura 22 - Fluxograma da estratégia de operação do conversor estático IBS.
- Figura 23 - Esquema elétrico da Chave Estática de Transferência do conversor IBS.
- Figura 24 - Esquema elétrico da chave estática CA utilizada na simulação.
- Figura 25 - Diagrama do módulo de potência do conversor IBS.
- Figura 26 - Transferência da carga VSI quando a R aumenta a demanda de potência. (a) Tensão na barra SEP. (b) Corrente fornecida pela rede da concessionária. (c) Tensão na barra Green. (d) Corrente fornecida pela fonte de energia renovável.
- Figura 27 - Estado das 4 chaves estáticas de transferência. (a) Chave estática de transferência da carga R. (b) Chave estática de transferência da carga RL. (c) Chave estática de transferência da carga VSI. (d) Chave estática de transferência da carga CSI.

Figura 28 - Comutação das VSI e CSI para a barra SEP.

Figura 29 - Estado das 4 chaves estáticas de transferência. (a) Chave estática de transferência da carga R. (b) Chave estática de transferência da carga RL. (c) Chave estática de transferência da carga VSI. (d) Chave estática de transferência da carga CSI.

Figura 30 - Transferência das cargas CSI e RL para a barra SEP.

Figura 31 - Estado das 4 chaves estáticas de transferência. (a) Chave estática de transferência da carga R. (b) Chave estática de transferência da carga RL. (c) Chave estática de transferência da carga VSI. (d) Chave estática de transferência da carga CSI.

Figura 32 - Implementação física do conversor estático IBS.

Figura 33 - Diagrama do protótipo montado em laboratório.

Figura 34 - Interrupções para medição dos sinais de tensão e corrente.

Figura 35 - CH1 - Sinal de saída na placa de condicionamento (tensão). CH2 – Onda quadrada de detecção de zero crossing.

Figura 36 - CH3 - Sinal de saída na placa de condicionamento (corrente). CH4 – Onda quadrada de detecção de zero crossing na corrente.

Figura 37 - Bancada montada para realização dos testes com o conversor IBS.

Figura 38 - Sinais medidos para as chaves estáticas CA operando com carga puramente Resistiva (R).

Figura 39 - Tensão nos terminais da Chave Estática CA quando em bloqueio.

Figura 40 - Tensão nos terminais da Chave Estática CA quando em bloqueio e nos terminais da carga quando em condução.

Figura 41 - Tensão nos terminais da carga RL (indutiva).

Figura 42 - Diagrama elétrico do conversor IBS montado em laboratório para o teste de transferência de carga.

Figura 43 - Etapas de uma transferência de carga. (a) Carga conectada na Fonte Renovável. (b) Etapa intermediária do processo de transferência de Carga. (c) Carga conectada na Rede da Concessionária.

Figura 44 - (CH1) - Tensão da rede da concessionária. (CH2) - Tensão da fonte de energia renovável. (CH3) - Sinal de comando da chave estática complementar. (CH4) - Sinal de comando da chave estática principal.

Figura 45 - (CH1) - Tensão da rede da concessionária. (CH2) - Tensão da fonte de energia renovável. (CH3) - Sinal de comando da chave estática complementar. (CH4) - Corrente da carga RL.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características das cargas identificadas pelo conversor.

Tabela 2 - Valores de Potência Aparente (VA) demandado pelas cargas.

LISTA DE ABREVIATURAS

IBS - Intelligent Bypass Switch.
SEP – Sistema Elétrico de Potência.
PCC - Point of Common Coupling.
CA - Corrente Alternada.
CC - Corrente Contínua.
GMG - Grupo Moto Gerador.
SCR - Silicon-Controlled Rectifier.
AC - Alternate Current.
DC - Direct Current.
SVR - Step-Voltage Regulators.
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
UPS - Uninterruptible Power Supplies.
STS - Static Transfer Switch.
DSP - Digital Signal Processing.
IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor.
A/D - Analógico-Digital.
CI - Circuito Integrado.
R - Carga resistiva.
RL - Carga resistiva indutiva.
VSI - Voltage Source Inverter.
CSI - Current Source Inverter.
FP - Fator de Potência.
FOC - Fator de Ocupação de Cargas.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	14
1.2 - OBJETIVO GERAL	17
1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4 – JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	17
1.5 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 – CHAVE ESTÁTICA CA.....	19
2.2 – ARRANJOS ALTERNATIVOS PARA CHAVES ESTÁTICAS CA	22
2.2 – APLICAÇÕES QUE UTILIZAM CHAVES ESTÁTICAS CA.....	23
3 – DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR <i>IBS</i>.....	26
3.1 – APRESENTAÇÃO.....	26
3.2 – CHAVE ESTÁTICA CA.....	28
3.3 – CIRCUITO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE	29
3.4 – CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL	30
3.5 – UNIDADE DE PROCESSAMENTO DO CONVERSOR <i>IBS</i>	32
3.6 – CIRCUITO DE COMANDO DAS CHAVES ESTÁTICAS CA.....	33
3.7 – TÉCNICA DE IDENTIFICAÇÃO DE CARGA	35
3.8 – ESTRATÉGIA DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR	36
4 - RESULTADOS	39
4.1 – DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL	39
4.2 – RESULTADOS OBTIDOS EM SIMULAÇÕES	39
4.3 – RESULTADOS OBTIDOS COM O PROTÓTIPO DO CONVERSOR <i>IBS</i>	51
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
5.1 – CONCLUSÃO.....	65

5.2 – SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1 - Introdução

A energia elétrica é um fator determinante para o desenvolvimento econômico e social do mundo contemporâneo. Cada vez mais as políticas governamentais e as cargas conectadas ao sistema exigem um fornecimento de energia capaz de entregar potência com qualidade e confiabilidade. Diante desses desafios, as microrredes vem ganhando grande destaque no cenário mundial para solucionar problemas do fornecimento de energia elétrica, tais como ampliação da rede de distribuição, redução dos tempos de interrupção no fornecimento energia e alimentação de cargas críticas.

De acordo com (Lasseter, 2002), as microrredes são compostas por um conjunto de minigerações e cargas controláveis, tendo pelos menos uma geração baseada em tecnologia renovável. Como característica de operação, as microrredes possuem capacidade de trabalhar isoladas ou conectadas ao sistema elétrico de potência (SEP).

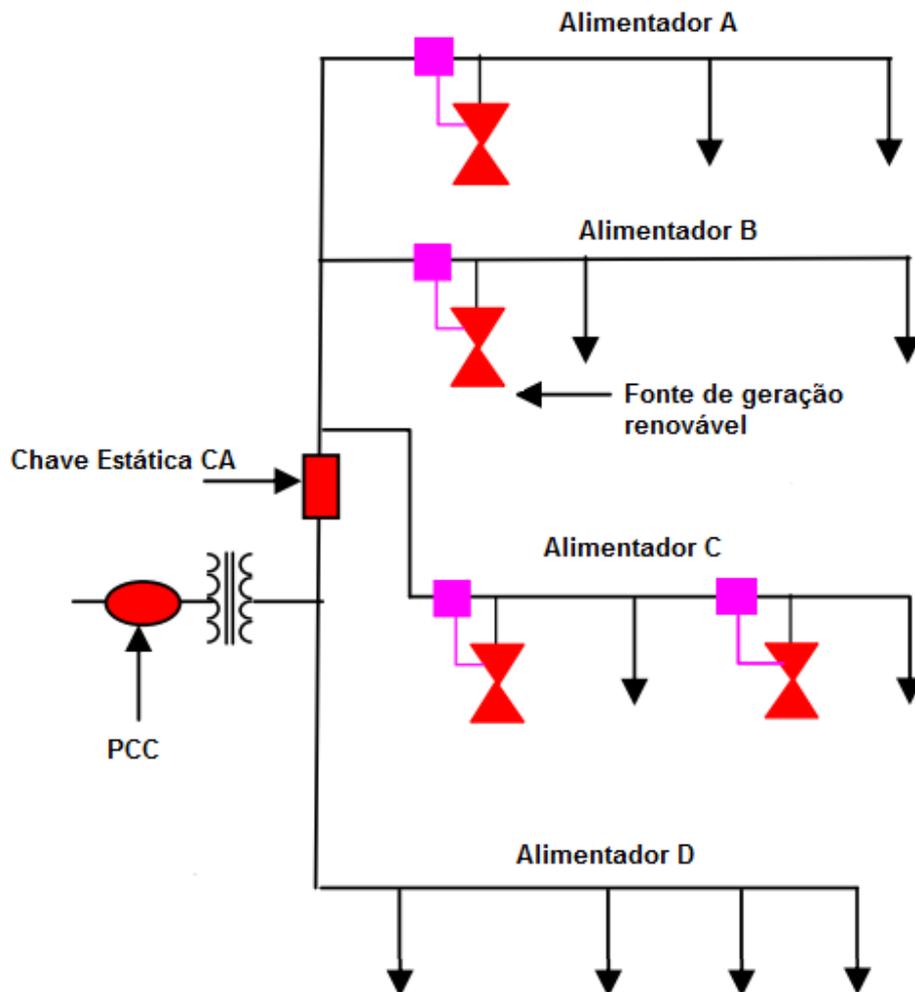
As microrredes, quando operando conectadas, possuem o fluxo de potência bidirecional, ou seja, há a possibilidade de injetar o excedente da geração ou receber complemento de energia do sistema para alimentação das cargas. Na ocorrência de distúrbios ou na ausência de fornecimento convencional (SEP), o controle das microrredes reconfigura sua topologia de modo a operar isoladas, garantindo assim a proteção e alimentação das cargas locais.

Um exemplo de arquitetura de microrredes é apresentada na Figura 1. Ela é formada por 4 microfones e é conectada ao SEP no ponto de acoplamento comum (do inglês, *Point of Common Coupling - PCC*) por meio de uma chave estática CA. Quando há um distúrbio na tensão ou ausência de fornecimento do SEP, o controle atua abrindo a chave estática e coloca a microrrede operando em modo isolado. Essa ação, além de garantir a alimentação para as cargas da microrrede, aumenta a confiabilidade e a qualidade da energia fornecida nos alimentadores A, B e C (Lasseter, 2007).

As unidades de geração que compõem as microrredes são baseadas em fonte de energia renovável como, por exemplo, painéis fotovoltaicos e mini-aerogeradores eólico. Na operação, as microrredes possuem um controle inteligente que mantém as cargas locais sempre energizadas, prioritariamente, a partir das fontes de energia limpa, assegurando sempre o balanço entre demanda e geração.

Outro exemplo de utilização das microrredes é apresentado na Figura 2. Esse modelo é composto por um grupo moto gerador (GMG) e um sistema de armazenamento que garante a não-interrupção do fornecimento de energia durante a transferência das cargas da concessionária para o gerador secundário ou auxiliar.

Figura 1 - Modelo de arquitetura para uma microrrede.



Fonte: (Lasseter, 2007).

A microrrede da Figura 2 tem a finalidade de alimentar cargas sensíveis que não podem ter o fornecimento de energia interrompido. Caso o fornecimento de energia dos consumidores seja transferido para a geração auxiliar e o GMG não consiga suprir a demanda das cargas, o controle da microrrede atuará desligando os consumidores com menor prioridade, visando assim a manutenção do balanço de potência na microrrede (Chowdhury et al, 2009).

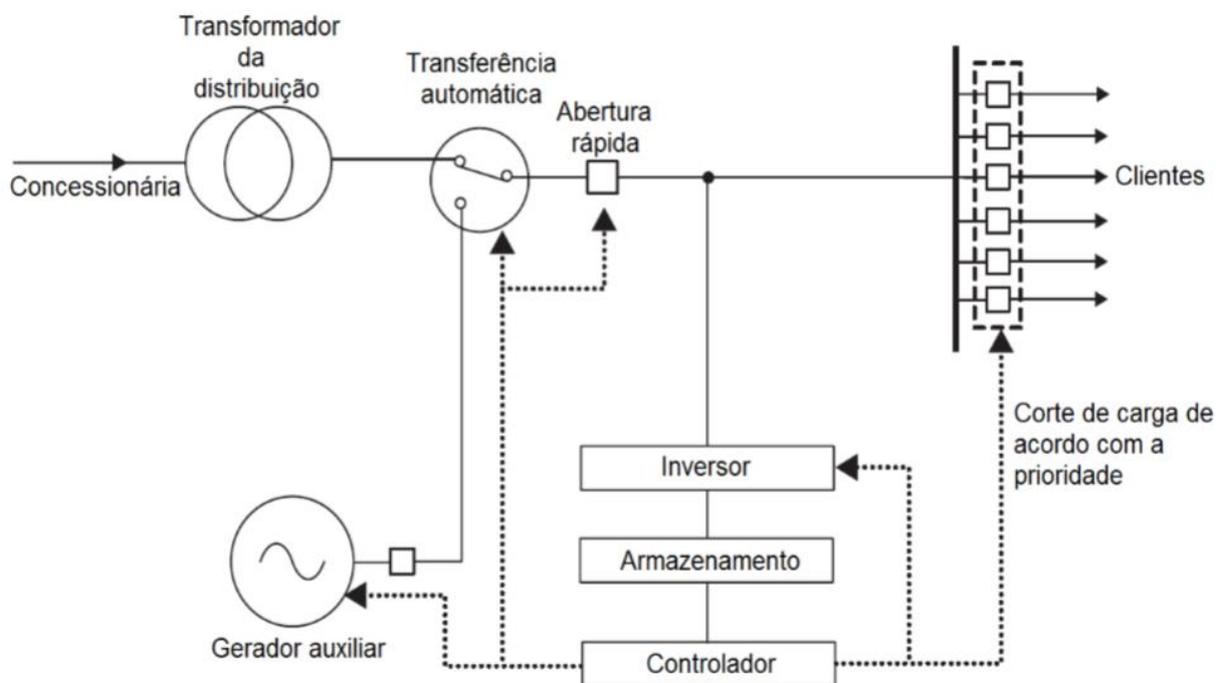


Figura 2 - Modelo de microrrede para atendimento a cargas prioritárias.

Fonte: (Chowdhury et al, 2009).

Nesse cenário de utilização e desenvolvimento das microrredes para solucionar problemas no fornecimento de energia, a eletrônica de potência desempenha um papel fundamental com a disponibilização de conversores para o condicionamento da energia gerada e no controle das chaves estáticas responsáveis pela reconfiguração da topologia das redes.

Tendo em vista essa importância da eletrônica de potência, o presente trabalho mostra o desenvolvimento de um conversor estático denominado *Intelligent Bypass Switch* (IBS) para utilização em microrredes. Esse conversor tem como características de operação a capacidade de identificar cargas lineares e não-lineares, monitorar em tempo real o balanço carga/geração e realizar a transferência de cargas entre fontes de uma microrrede e o SEP.

1.2 - Objetivo Geral

Este trabalho tem como propósito o desenvolvimento do conversor estático IBS capaz de realizar a transferência de cargas entre uma microrrede e o SEP no momento em que as fontes de energia renováveis não conseguem garantir o balanço carga/geração.

Para realizar as transferências o algoritmo de controle do IBS monitora os valores de potência aparente, o tipo de carga (linear ou não-linear) e opera de forma seletiva na comutação entre barras visando a maximização do despacho potência das fontes renováveis.

1.3 - Objetivos Específicos

Além de obter ao final deste trabalho um conversor estático capaz de controlar a alimentação das cargas locais em uma microrrede, tem-se também como objetivos específicos os seguintes pontos:

- Montar uma chave estática CA;
- Verificar a operação da chave na abertura e fechamento dos circuitos;
- Montar um circuito de medição de tensão e corrente;
- Implementar um algoritmo de detecção da passagem por zero (zero crossing) da corrente e tensão;
- Desenvolver o algoritmo da unidade de controle do IBS com base na seleção de cargas;
- Elaborar o circuito de disparo (gate-driver) necessário para ligar e desligar a chaves estática CA;
- Avaliar a operação do IBS com diferentes tipos de cargas;

1.4 – Justificativa do Trabalho

As microrredes são uma tendência mundial para solucionar os problemas de crescimento da demanda e fornecimento da energia elétrica. Além do desenvolvimento de conversores para os sistemas de geração renovável, uma operação eficiente das microrredes necessita de um controle inteligente com rápida resposta aos problemas de suprimento de energia.

Nesse sentido, o desenvolvimento de conversores estáticos para controle das microrredes ganha importância para implantação dessas redes e solução dos problemas de fornecimento. É nesse contexto que o presente trabalho propõe a implementação de um

conversor estático capaz de controlar a operação de uma microrrede no sistema elétrico de potência.

1.5 – Organização do Trabalho

Esta monografia é composta por cinco capítulos, sendo que neste primeiro foi apresentado os conceitos de operação das microrredes e sua importância para solucionar problemas de fornecimento de energia. Além disso, são apresentados os requisitos básicos de operação do conversor IBS cuja finalidade consiste em atuar no controle das microrredes.

No segundo capítulo, são abordados os conceitos de operação das chaves estáticas CA responsáveis pela conexão entre carga e fonte. É feito um estudo detalhado dessas chaves, pois por meio delas que o conversor IBS realiza o controle da topologia de operação da microrrede.

No terceiro capítulo, são descritos os circuitos eletrônicos que compõem o conversor estático IBS, bem como a apresentação da técnica de identificação e seleção de carga para a transferência da alimentação entre a microrrede e o SEP.

No quarto capítulo, há a apresentação da operação do IBS em ambiente simulado para comprovar a eficiência do conversor na identificação das cargas lineares e não-lineares, bem como a atuação na seleção de cargas para reconfiguração da microrrede. Além disso, são analisados os principais resultados obtidos com os testes do conversor em laboratório.

Por fim, no quinto e último capítulo há uma discussão sobre os resultados alcançados neste trabalho, destacando sua contribuição para pesquisas de desenvolvimento dos conversores em microrredes e as sugestões para continuidade do estudo.

2 – Fundamentação Teórica

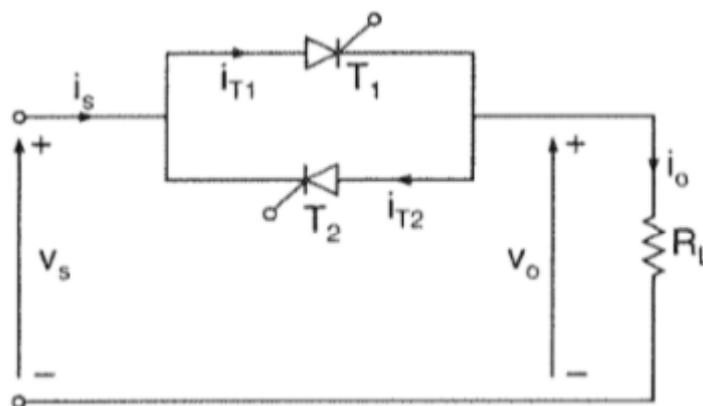
2.1 – Chave Estática CA

Uma chave estática CA consiste em um elemento capaz de controlar o fluxo de potência de uma fonte até uma carga. Essas chaves podem operar controlando o envio de potência de uma fonte CC ou CA. Quando operando com fonte CA, o controle da chave deve ser bidirecional e geralmente essas chaves estáticas são compostas por dois SCRs ligados em antiparalelo (Ahmed, 2000).

A utilização de semicondutores para realizar chaveamento tem como principal destaque a alta velocidade para ligar e desligar um circuito, podendo substituir seccionadores mecânicos e eletromecânicos. Além disso, chaves eletrônicas não possuem partes móveis o que aumenta sua durabilidade e evita a necessidade de manutenção desse equipamento.

A Figura 3 apresenta uma carga resistiva (R_L) alimentada por uma fonte alternada (V_s). A carga e a fonte são conectadas por meio da chave estática CA composta por dois tiristores, do tipo SCR, ligados em antiparalelo. A chave atua nesse circuito como uma espécie de disjuntor eletrônico, executando a função de ligar e desligar a carga, conforme o controle (Rashid, 1999).

Figura 3 - Chave Estática CA na configuração de dois tiristores tipo SCR ligados em antiparalelo.

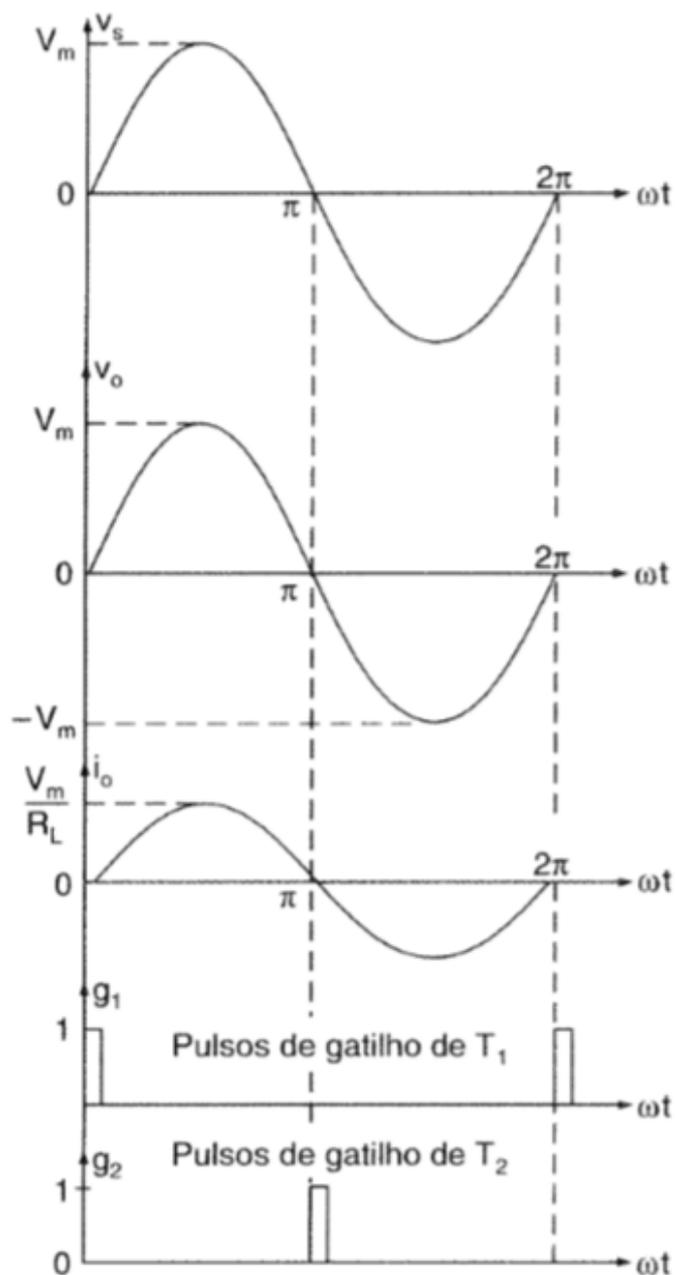


Fonte: (Rashid, 1999).

A carga do circuito apresentado acima é conectada a fonte quando pulsos de disparo são aplicados no *gate* dos SCRs. Para uma carga resistiva, os pulsos de disparo ocorrem nos instantes que começam os semiciclos positivo e negativo da tensão V_s , ou seja,

o disparo de T_1 ocorre quando $\omega t = 0$, enquanto T_2 é disparado quando $\omega t = \pi$. Logo, a tensão de saída (V_o) será igual a tensão de entrada (V_s). A Figura 4 mostra a forma de onda das tensões de entrada e saída, corrente na carga e os pulsos de disparo dos tiristores. Para desligar a chave CA, basta inibir os sinais de disparo dos SCRs e os mesmos entrarão em modo de bloqueio, assim que a corrente da carga cruzar o eixo das abscissas.

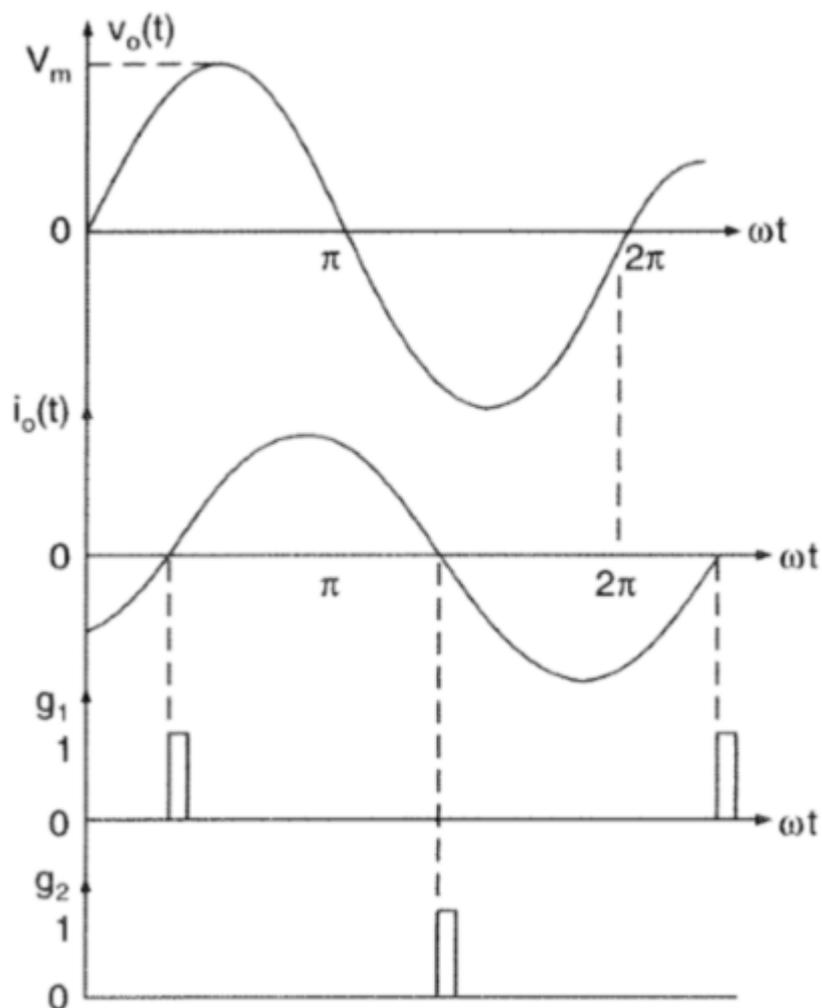
Figura 4 - Formas de ondas para uma carga resistiva após a condução da chave estática CA.



Fonte: (Rashid, 1999).

Quando o ângulo entre tensão e corrente na carga for diferente de 0° , o modo de disparo dos SCRs deve ocorrer no momento de passagem pelo zero da corrente. Ou seja, para uma carga indutiva, a condução de T_1 deverá ocorrer quando a corrente de carga cruzar o zero após início do semiciclo positivo da tensão (V_s). Por outro lado, para fazer T_2 conduzir, é necessário aplicar o sinal de disparo quando a corrente de carga cruzar o zero após o início do semiciclo negativo da tensão (V_s). A Figura 5 apresenta a operação da chave CA com carga de perfil indutivo (RL) (Rashid, 1999).

Figura 5 - Análise do disparo da chave estática CA operando com carga indutiva.



Fonte: (Rashid, 1999).

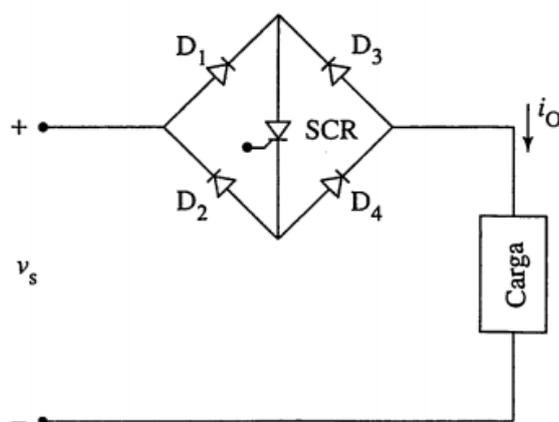
2.2 – Arranjos Alternativos para Chaves Estáticas CA

As chaves estáticas CA podem ser montadas utilizando arranjos diferentes ao invés do uso de dois SCRs conectados em antiparalelo. Há a possibilidade de construir essas chaves com a combinação de diodos e SCRs, como se pode ver nas Figuras 6 e 7.

Segundo (Ahmed, 2000), os diodos são mais baratos do que os SCRs e não requerem circuito de disparo. Chaves estáticas montadas como na Figura 6 possuem um único circuito de disparo, uma vez que somente um SCR é disparado tanto para o semiciclo positivo quanto para o negativo.

A chave da Figura 6 consiste na ligação de um SCR nos terminais DC de um retificador de onda completa. No momento da passagem da corrente positiva os diodos D1 e D4 entram em modo de condução, no entanto na passagem de corrente negativa os diodos D3 e D2 conduzem enquanto D1 e D4 estão bloqueados. Para ambos os semiciclos, basta dar um pulso no *gate* do SCR para ocorrer a liberação de potência para a carga.

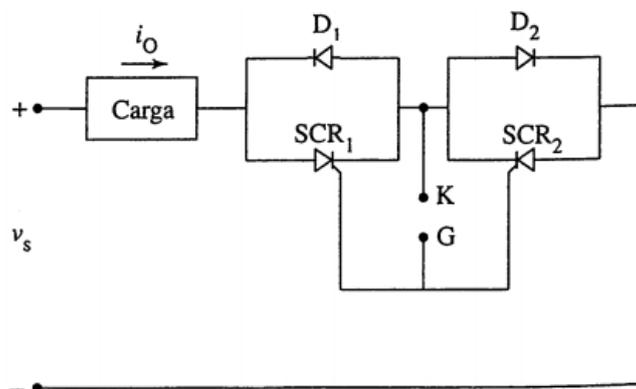
Figura 6 - Chave estática utilizando apenas 1 (um) SCR.



Fonte: (Ahmed, 2000)

Na Figura 7, a chave apresenta dois SCRs ligados com os cátodos comuns e diodos em paralelo. Esse modelo apresenta um custo superior quando comparado à chave de dois SCRs em antiparalelo; porém tem como vantagem a utilização de um único circuito de disparo, o que simplifica a lógica de controle. Para o semiciclo positivo conduzem o SCR1 e diodo D2, e para o negativo conduzem o SCR2 e o diodo D1.

Figura 7 - Chave estática utilizando 2 (dois) SCRs e com um único circuito de disparo.



Fonte: (Ahmed, 2000).

2.2 – Aplicações que Utilizam Chaves Estáticas CA

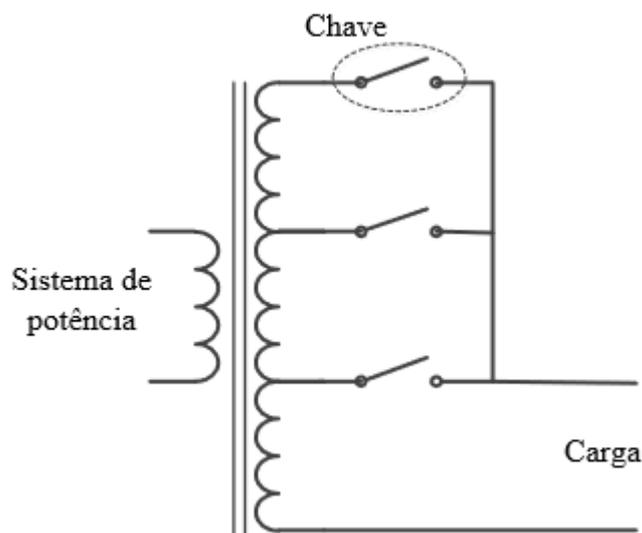
Após caracterizar o que é uma Chave Estática CA, é importante apresentar algumas das principais aplicações nas quais esses equipamentos são frequentemente utilizados.

2.3.2 – Comutação eletrônica de Taps em Transformadores

O transformador regulador de tensão é um equipamento responsável por controlar o valor eficaz da tensão numa barra ou alimentador. Ele atua aumentando ou diminuindo *Taps* de um transformador à medida que tensão de entrada altera, visando obter o mínimo de variação no valor eficaz da tensão de saída (Reis, 2013).

Os transformadores que operam regulando os *Taps* para ajuste de tensão de saída são conhecidos como Reguladores de Tensão por Degraus (do inglês, *Step-Voltage Regulators*, SVR) ou como Transformadores Reguladores (ABNT, 1992). A Figura 8 mostra, esquematicamente, um transformador monofásico com *Taps* ajustáveis no secundário. A medida há uma variação no valor eficaz da tensão de entrada, é realizado a comutação dos *Taps* no intuito de regular na tensão de saída na carga. A comutação ocorre a partir da abertura e fechamento de chaves presentes no secundário do transformador.

Figura 8 – Esquema elétrico de um Transformador Regulador de Tensão.



Fonte: (Reis, 2013).

As chaves presentes no transformador regulador de tensão da Figura 8 podem ser eletromecânicas ou estáticas. Quando as mesmas são eletromecânicas a dinâmica de compensação é lenta, pois para ajustar os *Taps* o comutador eletromecânico precisa varrer degrau por degrau até atingir o ponto de compensação. Entretanto, ao utilizar chaves estáticas a dinâmica de ajuste do regulador é rápida, pois para bastará apenas comandar duas chaves para se obter uma tensão regulada na saída (Faiz e Siahkollah, 2006).

Além da redução no tempo compensação da tensão, as chaves estáticas aumentam a eficiência do transformador regulador, pois eliminam a ocorrência de arco elétrico presentes na comutação mecânica de *Taps*, o que gera custos adicionais com manutenção do equipamento.

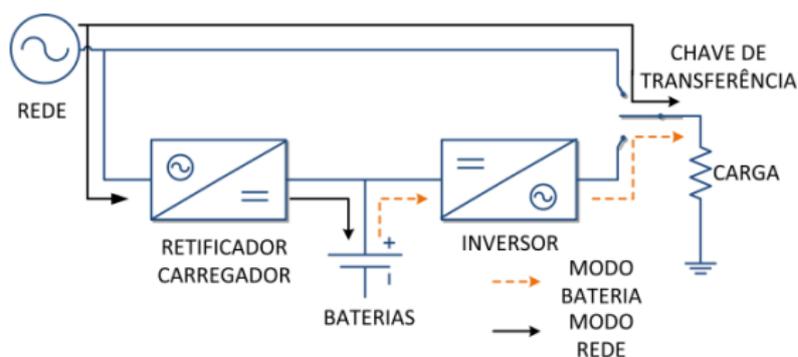
2.3.2 – Alimentação de cargas críticas

Em sistemas onde o fornecimento de energia elétrica não pode ser interrompido é previsto a utilização de fontes de emergência como UPS (do inglês, *Uninterruptible Power Supplies*) capazes de manter a alimentação das cargas críticas mesmo na ausência de serviço da rede elétrica.

Quando há uma falta de energia na rede, uma chave estática de transferência (do inglês, *Static Transfer Switch - STS*) comuta a alimentação da carga crítica para a UPS. Ao identificar que a rede foi restabelecida, a STS transfere novamente a carga da UPS para a rede elétrica da concessionária (Rodrigues, 2016). A Figura 9 mostra, de forma

simplificada, como é feito a alimentação de uma carga crítica em um sistema de fornecimento ininterrupto.

Figura 9 - Esquema elétrico simplificado de uma UPS.

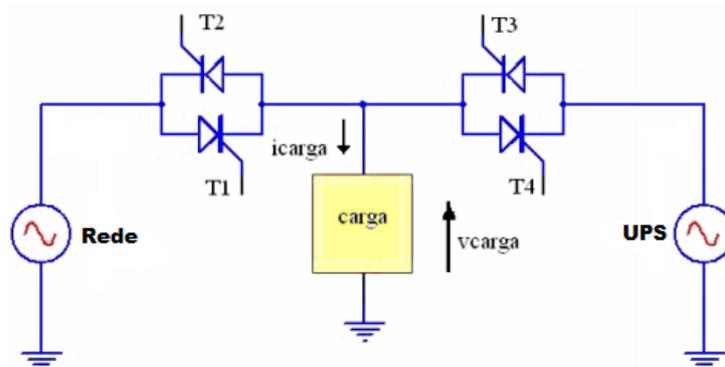


Fonte: (Rodrigues, 2016).

Para realizar a transferência da alimentação, as STS utilizam duas chaves estáticas CA em substituição às chaves eletromecânicas. A opção pelas chaves estáticas deve-se ao fato de obter uma redução significativa no tempo de transferência garantindo, assim, que a carga fique o mínimo de tempo possível sujeita às oscilações da fonte que apresenta um distúrbio.

A Figura 10 apresenta uma STS composta por duas chaves estáticas no arranjo, com dois SCRs em antiparalelo. Supondo que a carga esteja conectada à rede, o algoritmo de controle, ao identificar um distúrbio, desliga os tiristores T1-T2 e aciona T3-T4, que são responsáveis por conectar a carga na UPS.

Figura 10 - STS composta por duas chaves estáticas CA.



Fonte: (Deus, 2011).

3 – Desenvolvimento do Conversor IBS

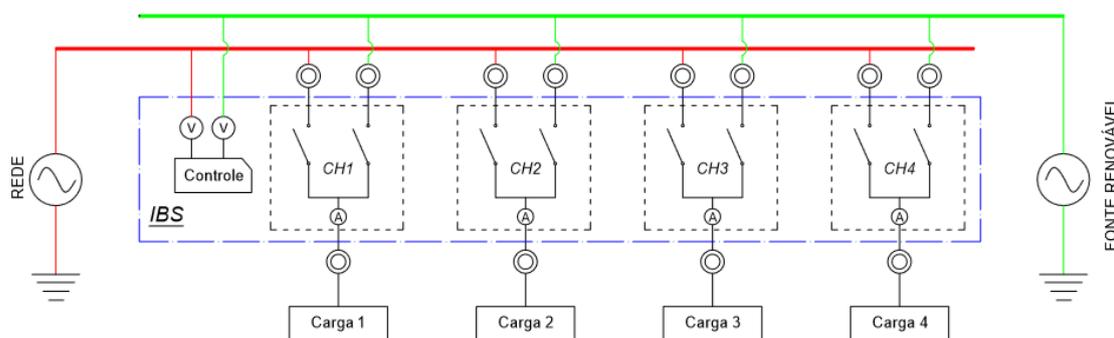
3.1 – Apresentação

O objetivo desse trabalho é apresentar o conversor estático IBS para a aplicação em microrredes. Esse conversor atua diretamente no sistema elétrico monitorando, em tempo real o despacho de potência de uma fonte renovável, no intuito de garantir o balanço entre carga e geração.

Para isso, o IBS é composto por chaves estáticas de transferência (STS) que realizam uma comutação de barramento quando a potência demandada pelas cargas é superior ao limite máximo de geração de uma fonte renovável. O sistema de controle do IBS faz a aquisição dos sinais de tensão e corrente das cargas, e identifica as lineares e não-lineares. Caso haja necessidade de retirar uma carga conectada na fonte renovável da microrrede, o algoritmo seleciona as cargas com menor demanda de potência e comuta aquela que mais afeta os indicadores de qualidade de energia elétrica.

A Figura 11 apresenta o diagrama geral do IBS com 4 cargas conectadas. No momento em que o conversor é ligado, as cargas são conectadas na fonte renovável e caso a demanda de potência das mesmas seja superior ao limite gerado, o conversor selecionará cargas para serem transferidas de barra.

Figura 11 - Diagrama geral de conexão do conversor IBS.

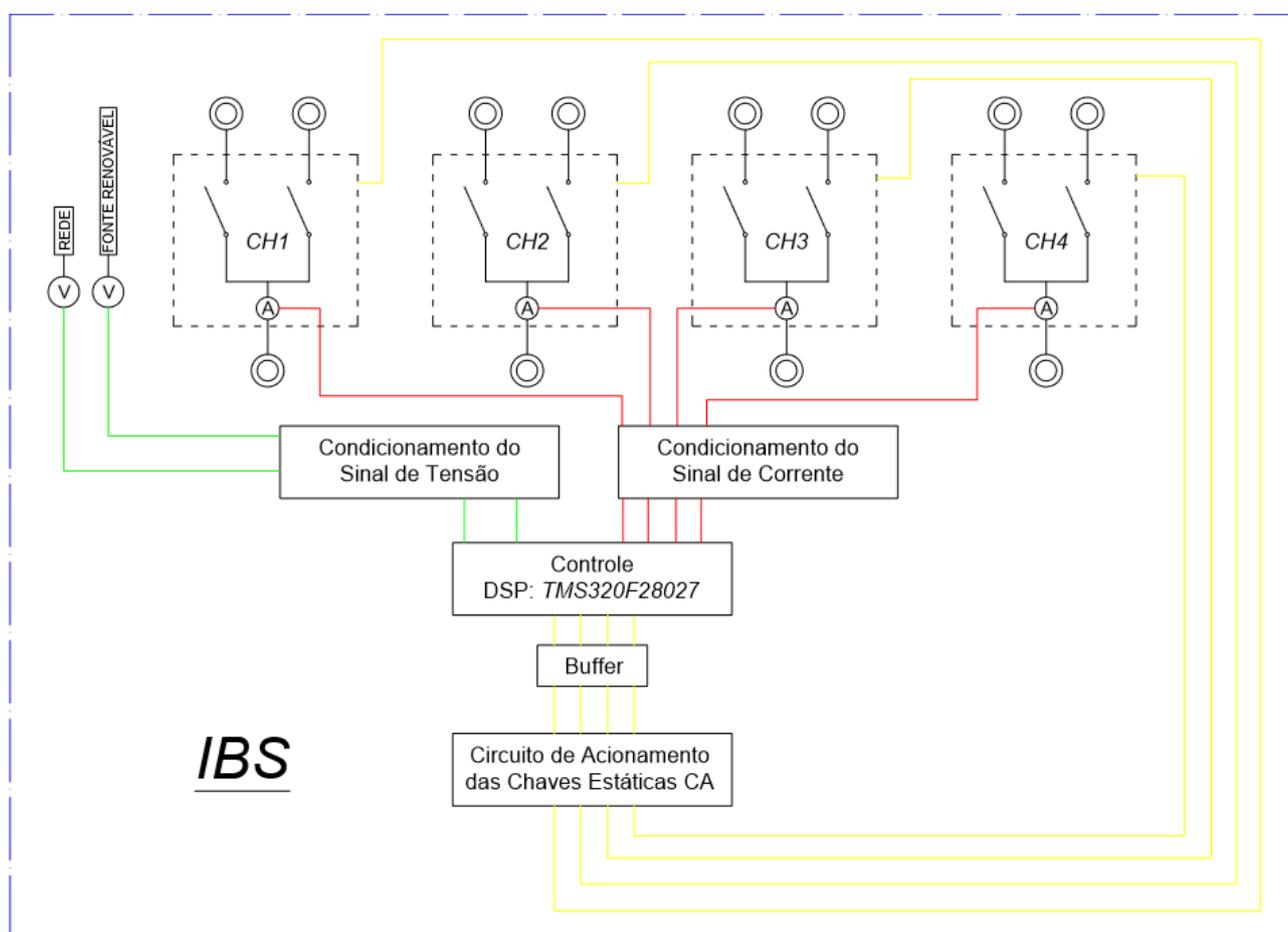


Para a operação do conversor IBS, foi necessário o desenvolvimento de circuitos de medição de tensão e corrente, placas de condicionamento de sinal, programação de um DSP (do inglês, *Digital Signal Processing*) com a lógica de controle e montagem dos circuitos de disparo que ligam/desligam as chaves estáticas de transferência.

As chaves que compõem o IBS foram montadas em um arranjo híbrido, utilizando IGBT's e não SCR's. A opção pelo modelo híbrido visou a redução de custos na montagem e uma simplificação no comando das chaves.

A Figura 12 mostra esquematicamente os circuitos de medição, controle e comando das chaves do conversor. Há uma grande similaridade com os circuitos utilizados em uma *Static Transfer Switch* (STS). Entretanto, a principal diferença entre os conversores é a quantidade de chaves que são controladas e a lógica de atuação no sistema. As STS's protegem uma carga crítica de distúrbios na tensão e o IBS transfere cargas entre barras visando garantir o máximo de despacho de potência das fontes renováveis. Ou seja, é possível que haja cargas sendo alimentadas por fontes diferentes no conversor IBS, o que não ocorre com as STS's.

Figura 12 - Circuito interno do conversor IBS.



No intuito de melhor compreender a montagem e a operação do conversor *Intelligent Bypass Switch* (IBS), serão apresentados nas próximas seções os aspectos técnicos dos circuitos que compõem o conversor e um descritivo da estratégia de funcionamento do mesmo.

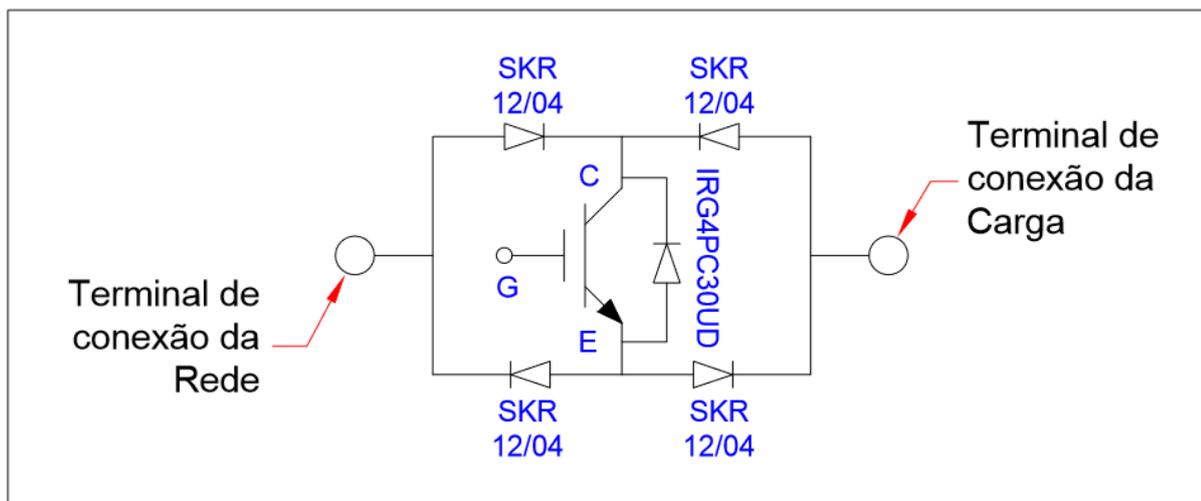
3.2 – Chave Estática CA

O componente responsável por realizar a conexão elétrica entre carga e fonte, no conversor IBS, é a chave estática CA. Nesse conversor, o arranjo físico escolhido para a montagem da chave foi o híbrido, constituído por 4 diodos.

Entretanto, o semicondutor de controle utilizado foi o IGBT devido aos mesmos apresentarem chaveamento rápido, baixa tensão de saturação e fácil controle para entrada/saída no modo de condução.

A Figura 13 apresenta o esquema elétrico de ligação dos componentes eletrônicos para a montagem da chave estática CA. Pode-se observar que o esquema é similar ao apresentado na literatura (Ahmed, 2000), tendo como principal diferença o tipo de semicondutor utilizado.

Figura 13 - Esquema elétrico de ligação da chave estática CA do conversor IBS.



O IGBT IRG4PC30UD da International Rectifier (IR) foi o escolhido para o projeto das chaves. O mesmo apresenta as seguintes características técnicas:

- Tensão de ruptura de 600V (V_{CES});
- Tensão de saturação de 1,4V [$V_{CE(on)}$];
- Tensão máxima entre gate-emissor igual a $\pm 20V$ [$V_{GE(max.)}$];
- Corrente de coletor igual a 12A operando a 100°C (I_c);

3.3 – Circuito de Medição de Tensão e Corrente

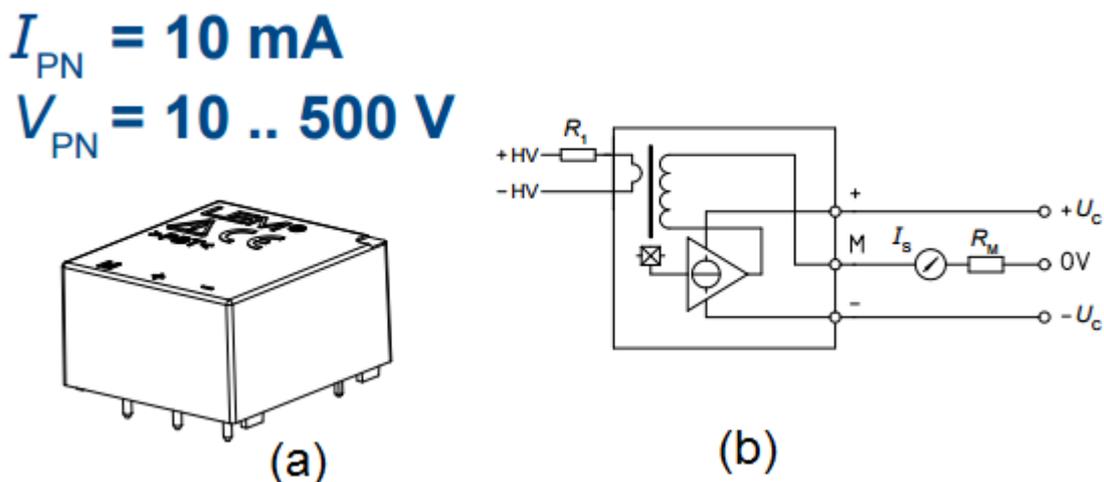
Para a leitura dos valores de tensão nas barras e corrente nas cargas, foi utilizado os transdutores de tensão e corrente do fabricante LEM no conversor. Esses componentes garantem uma isolamento galvânica entre o sinal medido e o circuito de controle, oferecendo uma proteção contra surtos no circuito de potência do IBS.

O transdutor de tensão utilizado é o LEM LV 25-P, cujas características elétricas são:

- I_{PN} (Corrente nominal primária) de $10mA_{rms}$;
- Tensão de alimentação em $\pm 12 \dots 15V$;
- I_{SN} (Corrente nominal secundária) igual a $25mA_{rms}$;

A Figura 14 apresenta o circuito interno e o encapsulamento do transdutor de tensão da LEM.

Figura 14 - Transdutor de tensão do fabricante LEM: (a) Encapsulamento. (b) Diagrama de conexão.



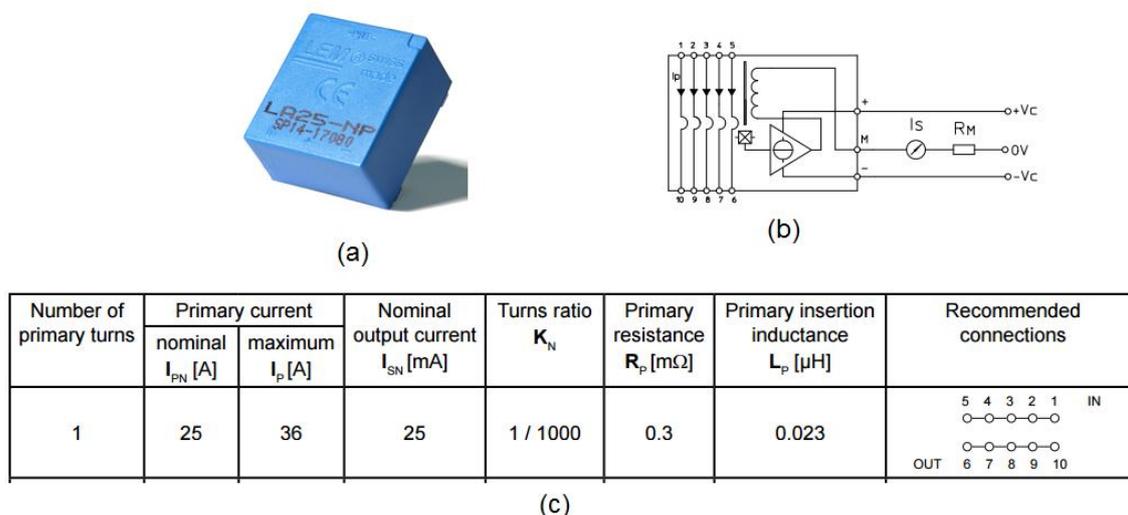
Fonte: (LEM, 2017).

O transdutor de corrente utilizado para a medição foi o LA 25-NP, cujas características elétricas principais são:

- I_{PN} (Corrente nominal primária) de $5 - 6 - 8 - 12 - 25A_{rms}$;
- Tensão de alimentação em $\pm 15V$;
- I_{SN} (Corrente nominal secundária) de $25mA_{rms}$;

A Figura 15 apresenta o circuito interno e o encapsulamento do transdutor de corrente da LEM utilizado no conversor IBS.

Figura 15 - Transdutor de corrente da LEM: (a) Encapsulamento. (b) Diagrama de conexão. (c) Relação de medição utilizada no conversor.



Fonte: (LEM, 2017).

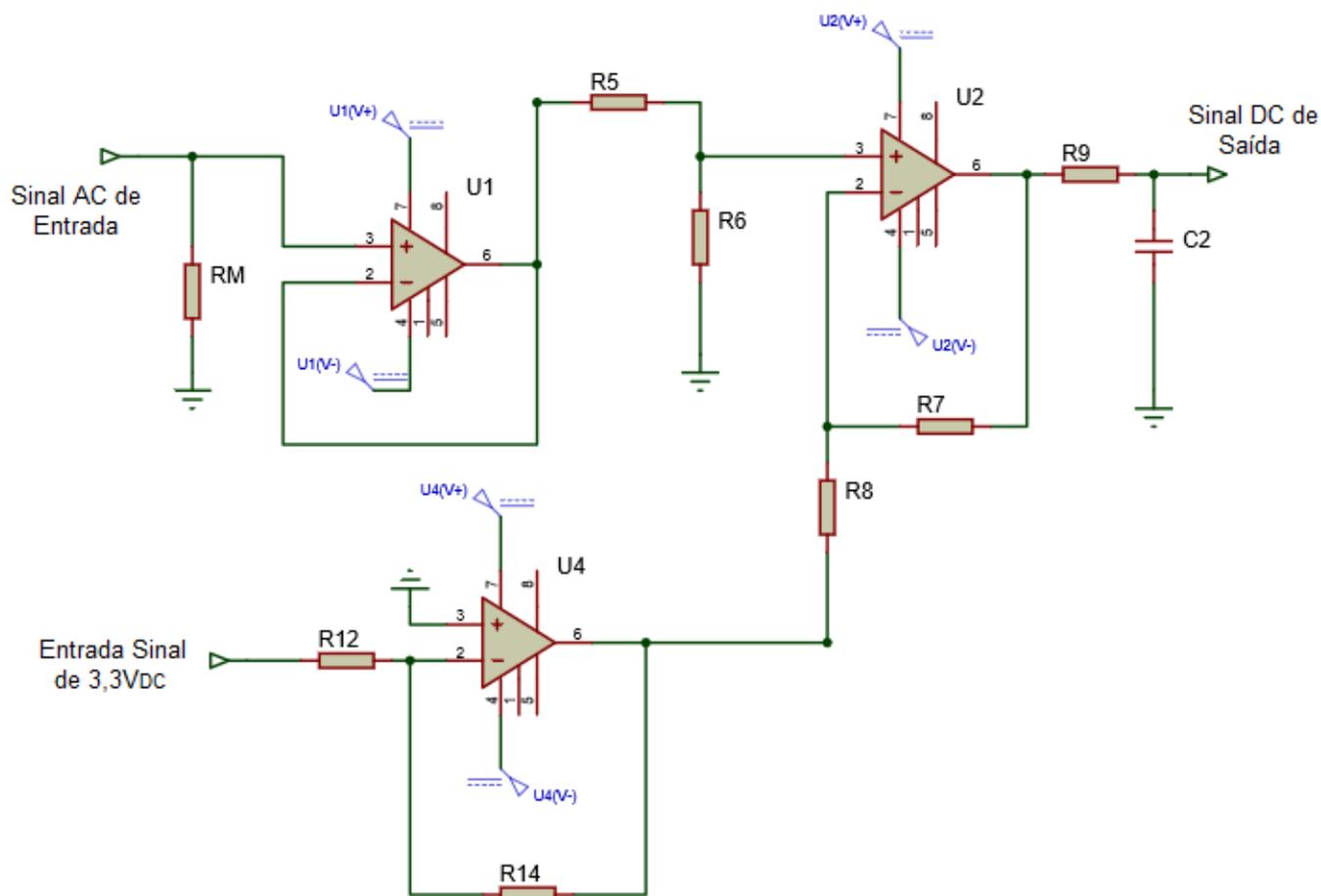
3.4 – Circuito de Condicionamento de Sinal

O conversor analógico/digital (A/D) utilizado no circuito de controle do conversor IBS, trabalha com sinais contínuos de valor positivo na faixa de 0 a $3,3V_{DC}$. Como a corrente de saída dos transdutores é AC, é necessário ajustar os níveis desses sinais para a faixa de leitura DC do conversor A/D.

A Figura 16 apresenta o esquema elétrico do circuito responsável por condicionar os sinais dos transdutores para a faixa de 0 a $3,3V_{DC}$. O circuito é composto por um seguidor de tensão que contém o resistor R_M , cuja função é converter a corrente de saída dos transdutores a um valor de tensão AC.

Outro circuito da placa de condicionamento é o amplificador de ganho igual a $1/2$, responsável por gerar o nível DC de $1,65V$. Esse sinal DC de $1,65V$, juntamente com o sinal AC do seguidor de tensão, são passados para um circuito somador produzindo na sua saída um sinal DC variável de 0 a $3,3V$.

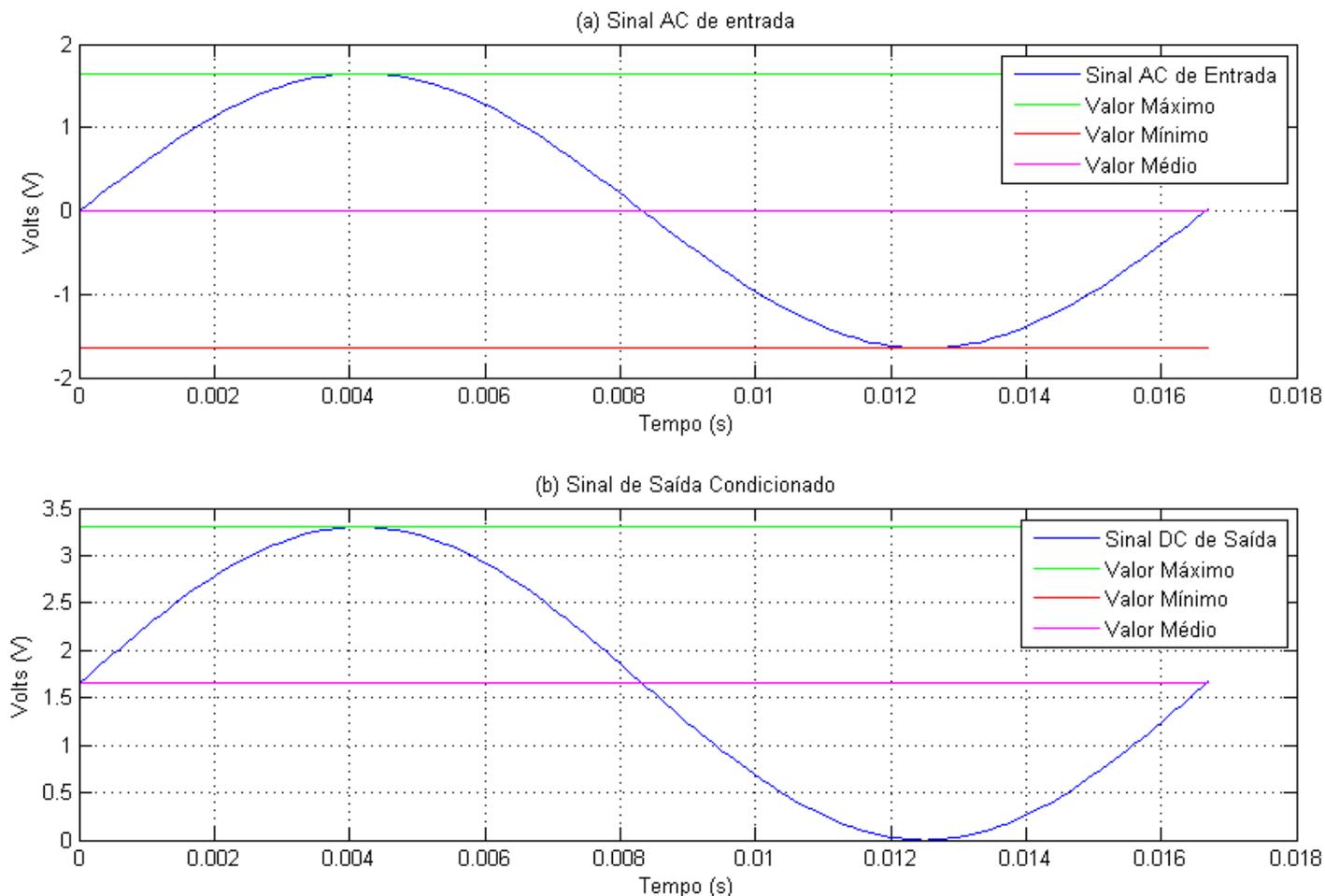
Figura 16 - Diagrama elétrico da placa de condicionamento de sinal.



A Figura 17 mostra um sinal AC de entrada e um DC de saída da placa de condicionamento. A tensão AC de entrada (Figura 17(a)) possui um valor de pico a pico igual a $3,3V$. Ao somar o sinal AC de entrada com o nível DC de $1,65V_{DC}$, obtém-se um sinal DC variável (Figura 17 (b)), sendo os valores máximo e mínimo igual a $+3,3V_{DC}$ e $0V_{DC}$, respectivamente. Esses valores do sinal de saída são compatíveis com a faixa de leitura do conversor A/D utilizado na unidade de controle do conversor IBS.

A placa de condicionamento desenvolvida nesse trabalho tem como parâmetros de operação duas alimentações: $\pm 15V_{DC}$ e $+3V_{DC}$.

Figura 17 - Comparação entre os sinais de entrada e saída da placa de condicionamento.



3.5 – Unidade de Processamento do Conversor *IBS*

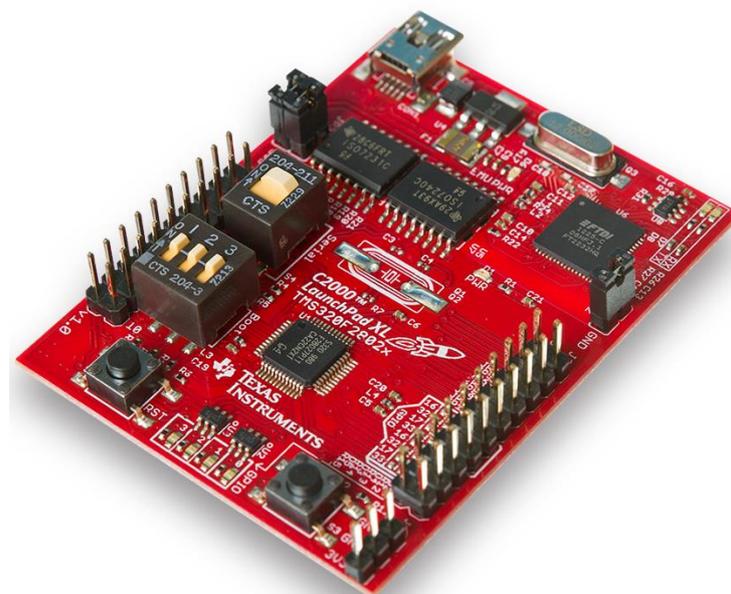
A unidade de processamento do conversor estático *IBS* é composta por um DSP (do inglês, *Digital Signal Processing*), cuja função é realizar a leitura dos sinais de tensão e corrente através do conversor A/D, executar o algoritmo de controle e comandar as chaves estáticas de transferência.

O DSP utilizado nesse trabalho é o C2000 Piccolo LaunchPad da Texas Instruments, o qual possui as seguintes características:

- Velocidade de processamento: 60 MIPS (do inglês, Million Instruction per Second);
- Número de saídas PWM: 8 de alta resolução;
- Conversor A/D de 12 bits;

A Figura 18 apresenta uma visão geral da placa do DSP responsável por controlar em tempo real a operação do conversor estático IBS.

Figura 18 - DSP utilizado no controle de operação do conversor IBS.



Fonte: (Texas Instruments, 2014).

3.6 – Circuito de Comando das Chaves Estáticas CA

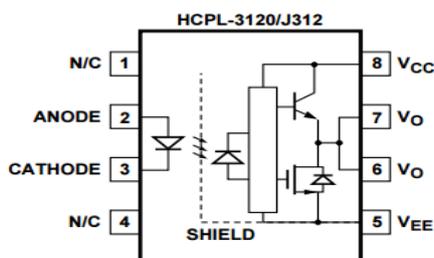
Conforme apresentado na seção anterior, o DSP C2000 Piccolo é o responsável por comandar a abertura e fechamento das chaves estáticas CA. O sinal de saída das portas digitais desse DSP é igual a 3,3V, sendo esse valor insuficiente para colocar os IGBTs IRG4PC30UD em modo de condução. Logo, há a necessidade da utilização de um circuito de disparo (do inglês, circuito de gate-driver).

O circuito integrado (CI) de gate-driver usado no protótipo do conversor IBS é o HCPL-3120 da Agilent Technologies. Esse CI é um circuito de disparo isolado e possui como restrição de projeto a capacidade comando de apenas um IGBT.

A Figura 19 mostra a disposição dos pinos e a representação interna do HCPL-3120. A operação do CI ocorre da seguinte forma: quando o LED emissor estiver polarizado diretamente (tensão do anodo maior do que no cátodo), o transistor superior conduz e, conseqüentemente, haverá uma conexão elétrica entre os pinos 7 e 8. Por outro lado, quando o LED não estiver polarizado (tensão do anodo igual à do cátodo), a conexão interna existirá entre os pinos 5 e 7 (Agilent Technologies, 2005).

A tensão máxima e mínima suportada pelo HCPL-3120 entre os pinos V_{CC} - V_{EE} é $15V_{DC}$ e $30V_{DC}$, respectivamente. Além disso, quando o LED estiver conduzindo é importante que haja uma corrente $[I_{F(on)}]$ de 7 a 16 mA passando pelo mesmo.

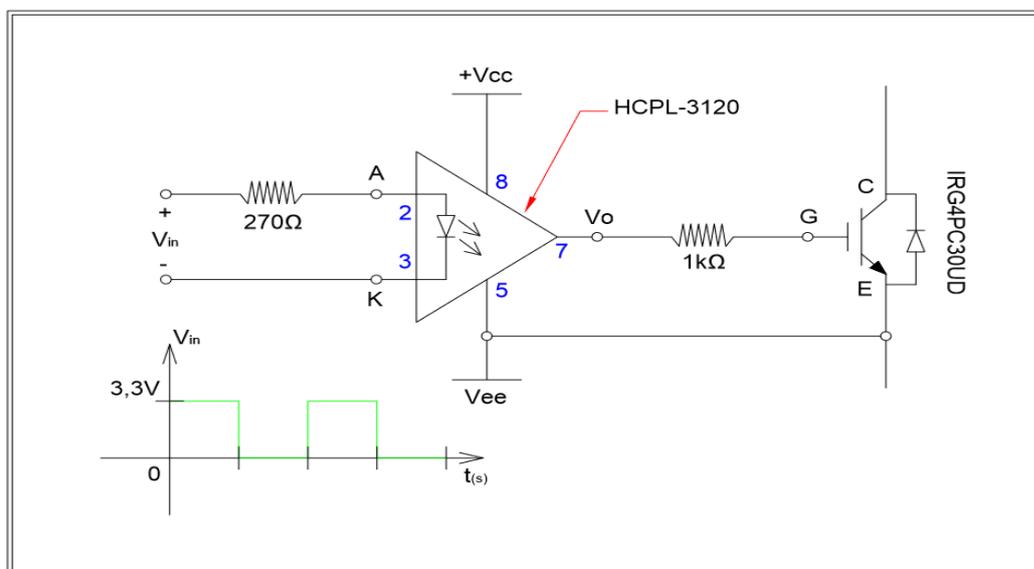
Figura 19 - Disposição dos pinos do circuito integrado (HCPL-3120).



Fonte: (Agilent Technologies, 2005).

A Figura 20 apresenta o esquema do circuito de gate-driver montado para acionar um IGBT da chave estática CA. O pino V_{CC} é conectado a uma fonte de +15V e o pino V_{EE} é conectado ao 0V. Quando o sinal de entrada é +3,3V, a tensão gate-emissor é igual a +15V e o IGBT entra em modo de condução. Por outro lado, se o sinal de entrada for 0V a tensão gate-emissor é 0V e o IGBT entra no modo de bloqueio.

Figura 20 - Conexões do circuito de gate-driver.



3.7 – Técnica de Identificação de Carga

Como dito anteriormente, o conversor IBS é capaz de identificar se as cargas ligadas a ele são ou não lineares. Para isso, o algoritmo de controle faz a medição da tensão e corrente nas cargas, e a partir do cálculo de potência o conversor determina se a carga é do tipo R, RL, VSI (do inglês, *Voltage Source Inverter*) ou CSI (do inglês, *Current Source Inverter*).

Para compreender melhor a técnica de identificação das cargas lineares e não-lineares, a Tabela 1 evidencia algumas das principais características das cargas R, RL, VSI e CSI.

Tabela 1 - Principais características das cargas identificadas pelo conversor.

CARGA	CARACTERÍSTICA
R	<ul style="list-style-type: none"> • Fator de potência (FP) unitário; • Potência instantânea [$p(t)$] somente com valores positivos;
RL	<ul style="list-style-type: none"> • Fator de potência (FP) menor do que 1; • Potência instantânea [$p(t)$] com valores negativos e positivos;
VSI e CSI	<ul style="list-style-type: none"> • Fator de potência (FP) menor do que 1; • Potência instantânea [$p(t)$] somente com valores positivos;

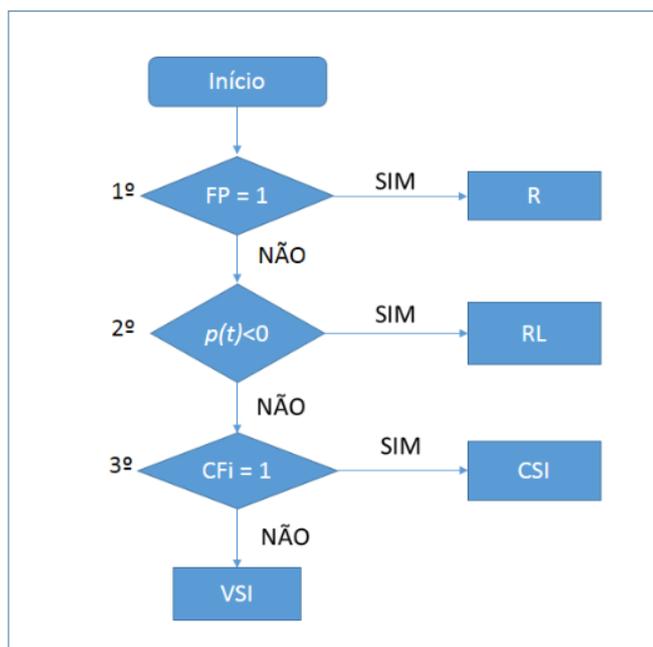
Logo, a partir das informações apresentadas na Tabela 1, o conversor é capaz de identificar se uma carga é tipo R, RL ou não-linear. Entretanto, para distinguir as cargas não-lineares (VSI e CSI) há a necessidade de adicionar uma terceira variável na tomada de decisão. Essa variável é o fator de crista da corrente de carga [do inglês, *Crest Factor* - (CFi)], definido pela Equação 1.

$$CFi = \frac{i_{pico}}{I_{rms}} \quad \text{Equação (1)}$$

em que, i_{pico} é o valor de pico da corrente de carga e I_{rms} é o valor eficaz de corrente da carga.

Cargas não-lineares do tipo CSI possuem forma de onda quadrada na corrente. Ondas quadradas tem o valor eficaz idêntico ao valor pico, assim pela Equação 1 o CFi será igual 1. Com essa última variável associada ao processo de identificação do tipo de carga, o algoritmo do conversor faz uma análise conforme apresentado no fluxograma da Figura 21, para determinação do tipo de carga conectada no conversor IBS.

Figura 21 - Fluxograma da função de identificação do tipo de carga.



Portanto, para determinar se uma carga é resistiva basta verificar se o FP é unitário. Cargas com perfil indutivo (RL) possuem o FP menor do que 1 e valores negativos na potência instantânea ($p(t)$). Cargas do tipo CSI possuem FP menor que 1, somente valores positivos de potência instantânea e CFi unitário. Por fim, cargas VSI diferem da CSI apenas no valor de CFi.

3.8 – Estratégia de Operação do Conversor

O propósito do conversor estático IBS é manter a barra de energia renovável fornecendo o máximo de potência possível para alimentação das cargas existentes na microrrede. Isso é obtido pela abertura e fechamento da chave estática que conecta a carga ao sistema prioritário.

A estratégia de operação do conversor consiste em amostrar 167 valores de tensão e corrente das cargas através do conversor A/D do DSP. Após a amostragem, o algoritmo interno calcula os seguintes valores:

- V_{rms} , valor eficaz de tensão;
- I_{rms} , valor eficaz de corrente;
- $p(t)$, potência instantânea;
- $P(W)$, potência ativa;

- $P(VA)$, potência aparente;
- fp , fator de potência;
- CFi , fator de crista da corrente;

sendo que, V_{rms} é calculado apenas para as barras e os demais valores para cada carga da microrrede.

A partir do número de cargas conectadas na fonte renovável, o algoritmo avalia o Fator de Ocupação de Cargas (FOC). O FOC é definido como a razão entre a soma da potência aparente das cargas pela potência limite da geração renovável (ver Equação 2).

$$FOC = \frac{\sum_{n=1}^4 Ch_n * P_n}{P_{limite-Renovável}} \text{ Equação 2}$$

Em que, P_n é o valor de potência aparente das cargas, $P_{limite-Renovável}$ é o limite de potência atendido pela fonte renovável da microrrede, Ch_n é igual a 1 quando a chave estiver ligada no barramento da fonte renovável e 0 para desligada.

Realizado esse processo de cálculo, o algoritmo verifica se o FOC da microrrede é maior do que 1 p.u.. Caso seja e permaneça maior do que 1 p.u. por mais de três ciclos consecutivos, a função de rejeição de carga é chamada para iniciar o processo de seleção e alívio do carregamento.

A primeira etapa do processo de alívio do carregamento é identificar as cargas com a menor demanda de potência aparente. Feito isso, o algoritmo verifica se o módulo da diferença da potência aparente de cada carga é menor do que 100VA. Caso seja, a função seleção é chamada e determina a carga que será rejeitada a partir da seguinte ordem de prioridade: VSI, CSI, RL e R. Entretanto, se a diferença entre os valores de potência for maior do que 100VA, a carga rejeitada será a que demandar o menor valor de potência aparente do sistema.

A segunda etapa do processo de alívio de carregamento, é chamada da função de abertura de chave que identifica a passagem por zero (do inglês, *zero crossing*) da corrente de carga e abre a chave estática principal, responsável por conectar a carga na barra renovável.

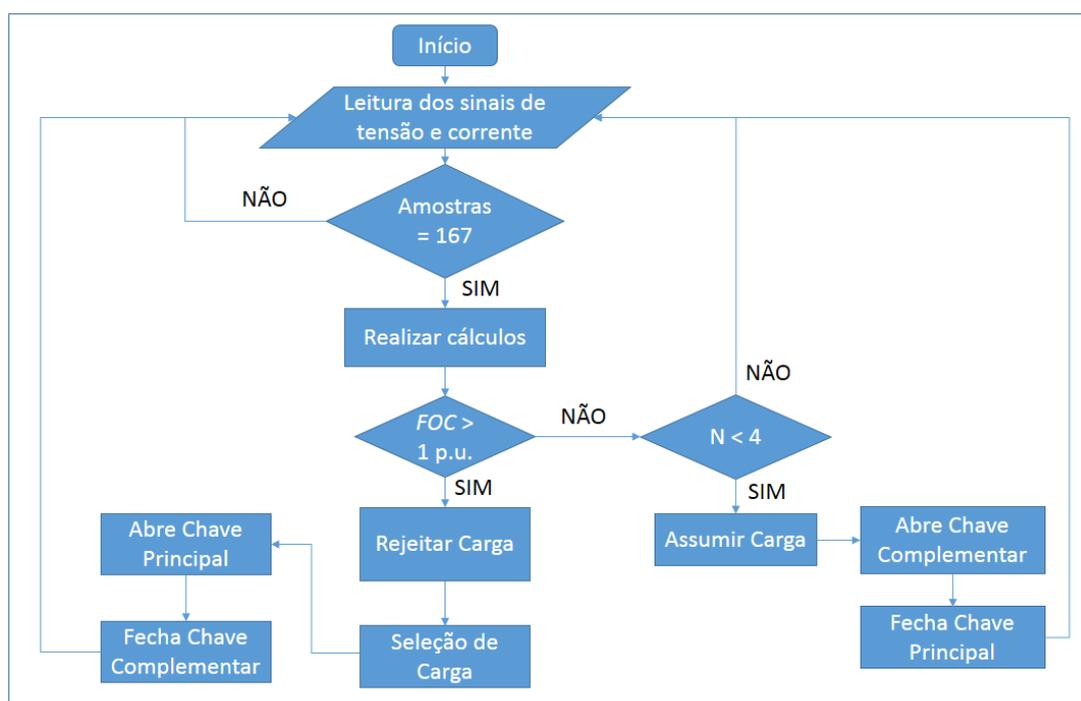
A terceira e última etapa no alívio do carregamento é a conclusão da transferência de carga com a chamada da função de fechamento de chave. Essa função detecta a passagem da tensão da barra SEP por zero e comanda o fechamento da chave estática complementar, que liga a carga na rede da concessionária (SEP).

Na situação em que o FOC é menor do que 1 p.u. e o número de cargas conectadas na barra renovável é menor que 4, o algoritmo verificará a possibilidade de assumir carga(s) visando manter o valor do FOC igual ou próximo de 1 p.u.. Para assumir

uma carga, a transferência será feita com a abertura da chave estática complementar e o fechamento da chave estática principal.

A Figura 22 apresenta um fluxograma que resume a estratégia de operação do conversor estático IBS, podendo-se concluir que o conversor procura manter o maior número de cargas possível conectadas à fonte principal (fonte renovável), garantido assim o balanço carga/geração no sistema da microrrede.

Figura 22 - Fluxograma da estratégia de operação do conversor estático IBS.



4 - Resultados

4.1 – Descrição Experimental

Os resultados obtidos com o desenvolvimento do conversor estático IBS são divididos em duas partes. Na primeira parte, são apresentados os resultados das simulações realizadas no software *Simulink*TM. Essas simulações foram importantes para validar a técnica de identificação de carga, avaliar a manutenção do FOC da fonte renovável próximo a 1 *p.u.* e a correta seleção das cargas para a transferência de barra.

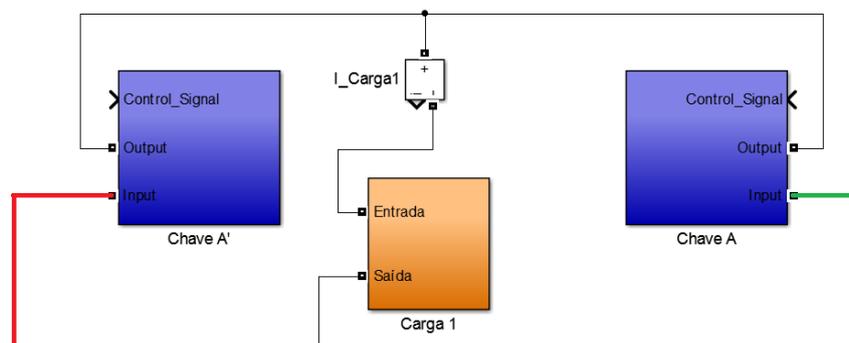
Na segunda parte, são mostrados os resultados dos testes realizados com o protótipo do conversor IBS em bancada de laboratório. Nesses testes, o objetivo foi validar a medição dos sinais de tensão e corrente, verificar a detecção de passagem por zero dos sinais medidos e avaliar a capacidade do conversor em comandar a abertura e fechamento das chaves estáticas CA.

4.2 – Resultados Obtidos em Simulações

Para simular a operação do conversor estático IBS, foi criado no *Simulink*TM um conjunto de chaves estáticas CA responsáveis por conectar as cargas aos barramentos.

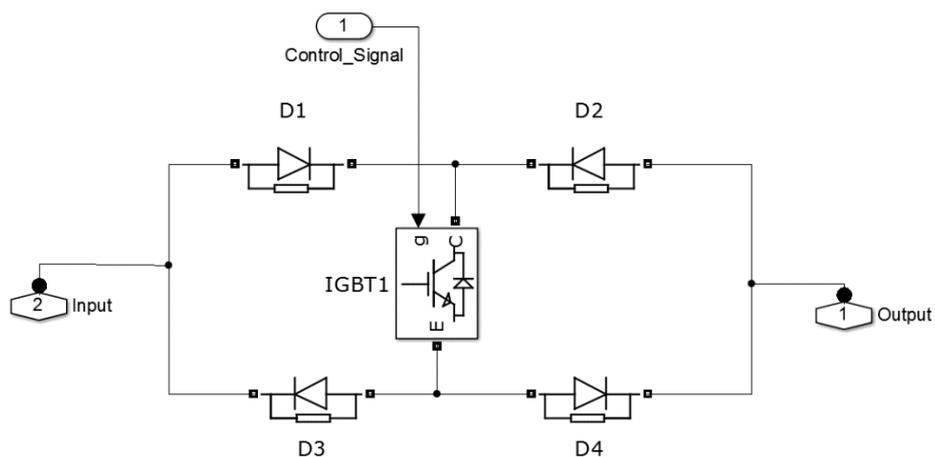
A Figura 23 apresenta o esquema elétrico de uma chave estática de transferência do conversor IBS. Assim como apresentado anteriormente, a chave de transferência utilizada no conversor é composta por duas chaves estáticas CA, denominadas de principal e complementar, sendo que a primeira é responsável por ligar a carga ao barramento de energia renovável e a segunda chave por conectar a carga a barra da concessionária (SEP). Além disso, a chave de transferência possui um amperímetro que mede a corrente de carga.

Figura 23 - Esquema elétrico da Chave Estática de Transferência do conversor IBS.



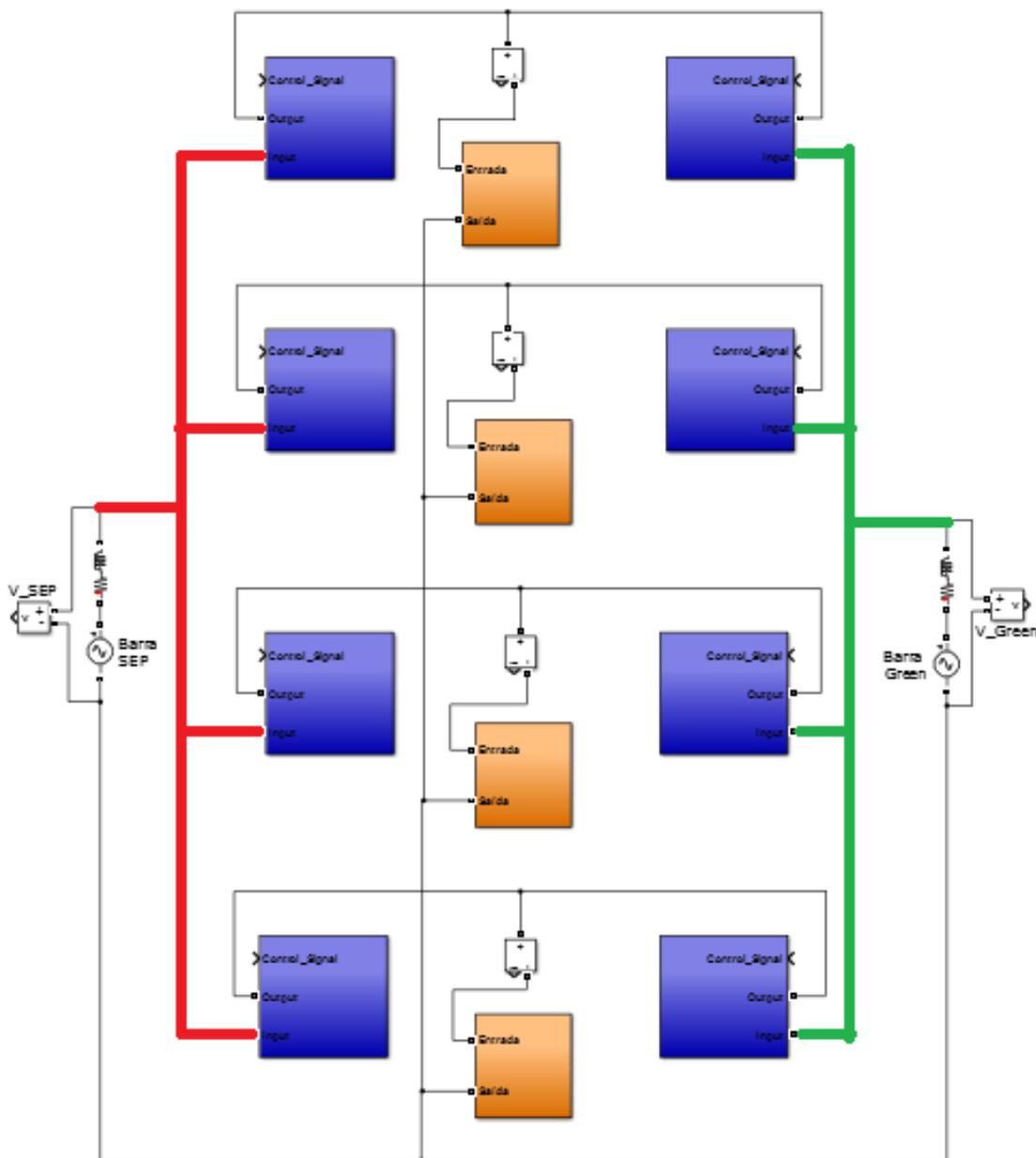
Dentro dos blocos que representam as chaves, foi montado o arranjo elétrico da chave estática CA utilizada no conversor IBS. A Figura 24 mostra o esquema elétrico de ligação dos componentes eletrônicos. Os terminais 1 e 2 conectam a carga ao barramento, e a entrada de sinal 1 (control_signal) é responsável por comandar a condução e o bloqueio do IGBT.

Figura 24 - Esquema elétrico da chave estática CA utilizada na simulação.



A Figura 25 apresenta o diagrama do módulo de potência do conversor IBS utilizado na simulação. A barra do SEP foi identificada na cor vermelha e a barra da fonte renovável está destacada na cor verde, sendo denominada na simulação como Barra Green.

Figura 25 - Diagrama do módulo de potência do conversor IBS.



Como o conversor opera em sistemas que não estão conectados, ou seja, geradores não sincronizados, as fontes que energizam a barra Green e SEP foram configuradas para a tensão nominal de $127V_{rms}$ e estão defasadas em 30° uma da outra na simulação.

Os valores demandados de potência aparente das quatro cargas que compõem a microrrede são apresentados na Tabela 2. A potência limite fornecida pela barra Green é $2000VA$, na simulação. Logo, para ocorrer uma transferência de barra há apenas a necessidade de aumentar a demanda por potência em qualquer uma das cargas, de forma a exceder o limite de fornecimento da fonte renovável (barra Green).

Tabela 2 - Valores de Potência Aparente (VA) demandado pelas cargas.

CARGA	Potência (VA)	FP
R	422	1
RL	419	0,70
VSI	442	0,75
CSI	463	0,90

Os três resultados das simulações que serão apresentados, tiveram como objetivo mostrar a capacidade do conversor IBS em manter o FOC da barra Green próximo de 1 *p.u.* e a correta operação da técnica de seleção de cargas. Em todas as simulações as cargas iniciaram conectadas na Barra Green.

4.2.1 – Aumento de potência na carga R e comutação da carga VSI:

Nessa primeira simulação, a carga resistiva demandou uma potência de 900VA da fonte renovável e as cargas RL, VSI e CSI mantiveram os valores de potência apresentados na Tabela 2. Com isso, o FOC da barra Green apresentou um valor superior a 111% gerando a necessidade da realização de transferência de carga.

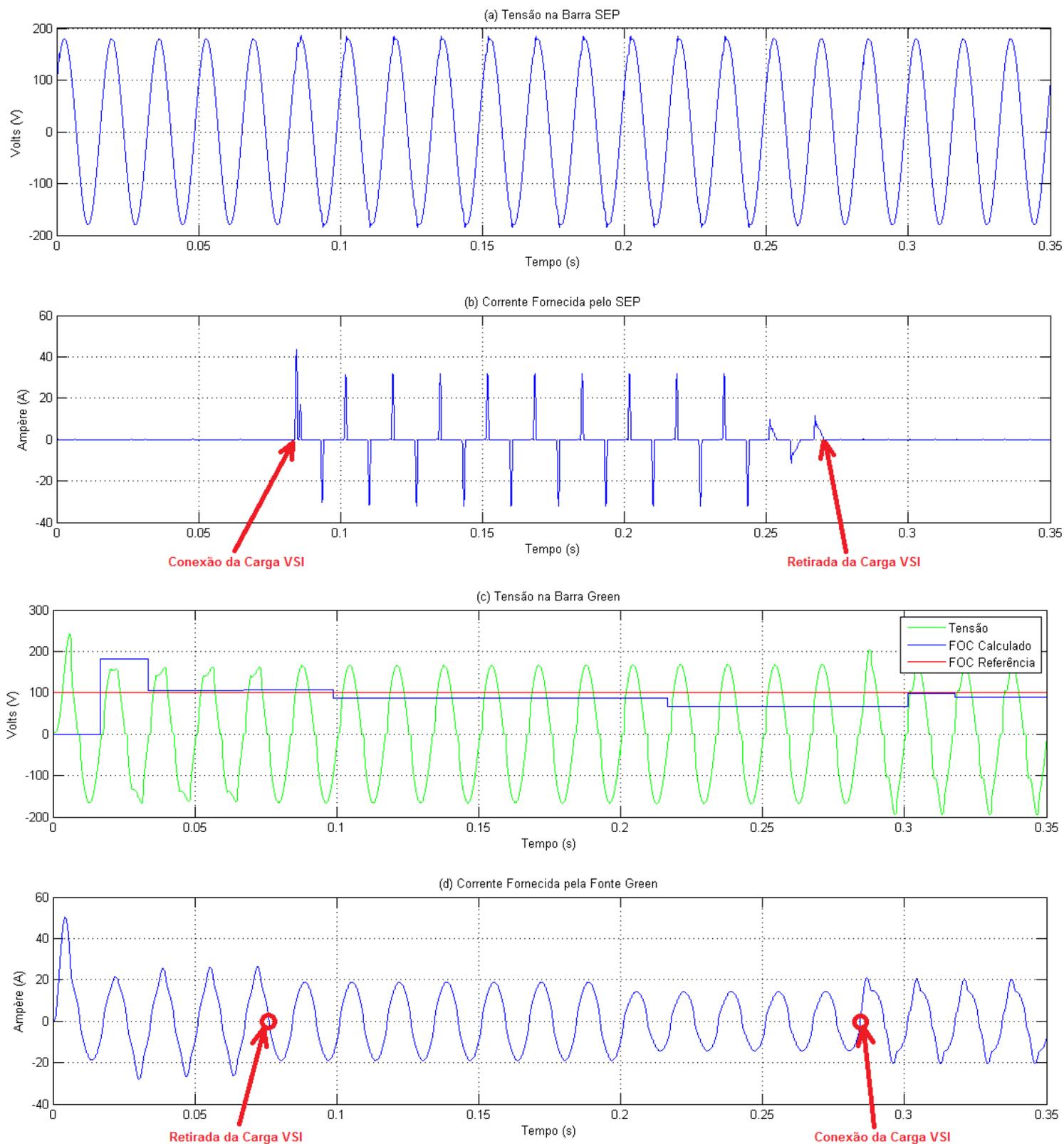
Como o módulo da diferença entre as potências das cargas RL, VSI e CSI é menor do que 100VA, a seleção da carga a ser comutada é realizada pela técnica de identificação de carga, ou seja, segue uma ordem de prioridade conforme o tipo de carga. Assim, para essa situação a carga rejeitada da barra Green é a VSI.

A Figura 26 apresenta o momento em que a carga VSI é transferida para a barra do SEP e o momento em que ela retorna para a Barra Green. Além disso, na Figura 26 (c) há uma linha vermelha que é a referência do FOC igual a 100% e outra linha azul que mostra o valor calculado da variável FOC a cada ciclo.

Deve-se atentar pela Figura 26 (c), que o algoritmo de controle do conversor IBS aguarda alguns ciclos para realizar a transferência da barra principal (Green) para a barra alternativa (SEP). Isso é feito para evitar que aumentos transitórios de potência de curta duração gerem uma transferência indevida de carga. Por outro lado, ao identificar que é possível assumir uma determinada carga, o algoritmo executa uma comutação quase que instantaneamente, mantendo assim o FOC da barra Green sempre próximo de 1 *p.u.*

Figura 26 - Transferência da carga VSI quando a R aumenta a demanda de potência.

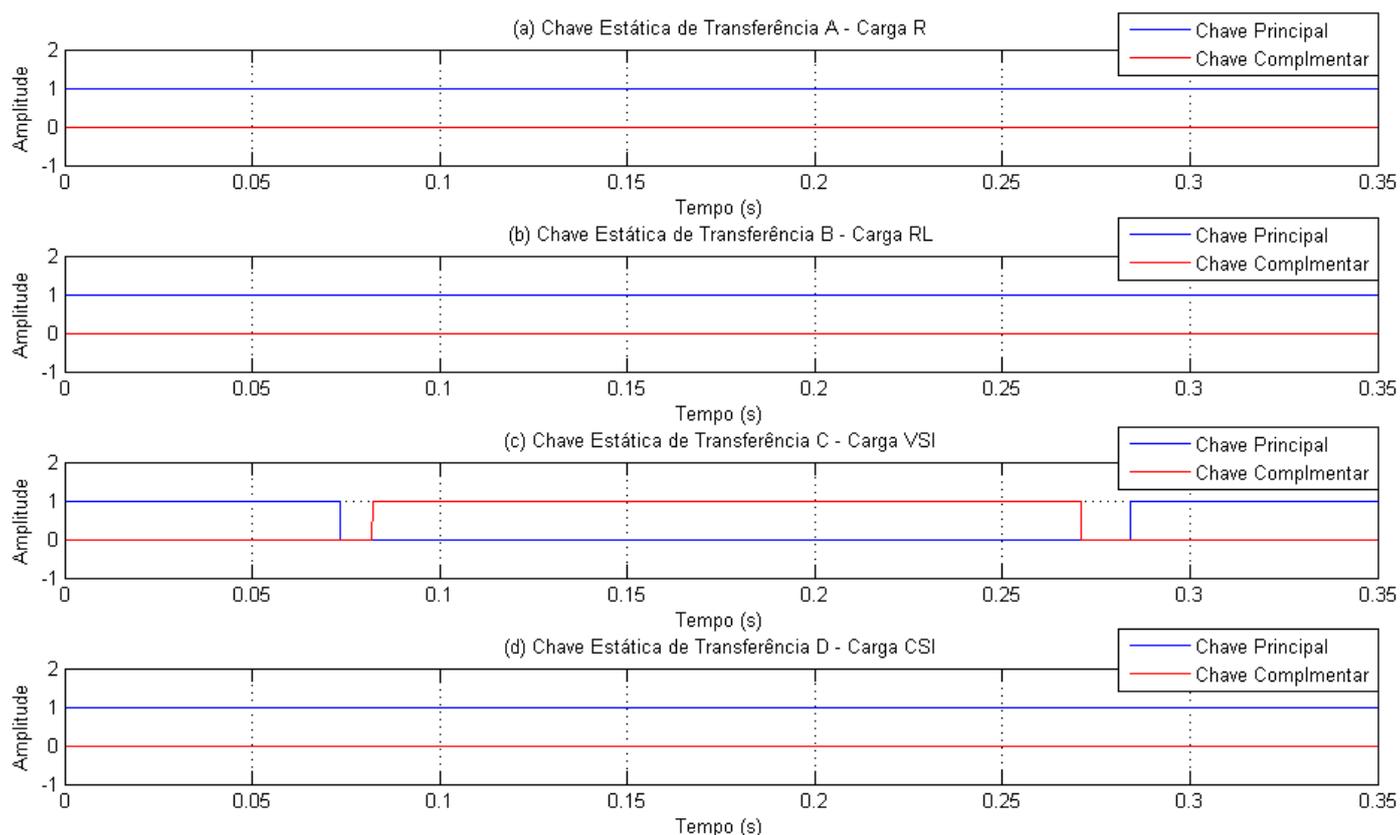
(a) Tensão na barra SEP. (b) Corrente fornecida pela rede da concessionária. (c) Tensão na barra Green. (d) Corrente fornecida pela fonte de energia renovável.



Na Figura 27 há a representação do estado das 4 chaves estáticas de transferência do conversor. A Figura 27 (c) mostra a comutação entre a chave principal e complementar que conectam a carga VSI na barra Green e SEP, respectivamente. Observa-se na Figura 27 (c), que durante a comutação entre as barras ocorre um atraso de tempo na abertura e no fechamento das chaves estáticas. Esse atraso é gerado devido a detecção de zero da corrente na abertura e zero de tensão no fechamento das chaves estáticas.

Destaca-se também na Figura 27, que as chaves estáticas de transferência das cargas R, RL e CSI mantiveram o estado inicial, permanecendo conectadas a barra Green. Isso prova que o algoritmo de controle do IBS foi capaz de identificar e selecionar a carga VSI para a comutação, mantendo na barra Green apenas as cargas prioritárias a serem alimentadas pela fonte renovável da microrrede.

Figura 27 - Estado das 4 chaves estáticas de transferência. (a) Chave estática de transferência da carga R. (b) Chave estática de transferência da carga RL. (c) Chave estática de transferência da carga VSI. (d) Chave estática de transferência da carga CSI.



4.2.2 – Aumento de potência na carga R e comutação das cargas VSI e CSI:

Nessa segunda simulação, a carga resistiva atingiu 1270VA de demanda por potência e, conseqüentemente, o FOC da barra Green ficou em 130%, gerando a necessidade de transferir duas cargas para a barra SEP. Na Figura 28 é apresentado as formas de ondas da tensão e corrente fornecidas pelas barras Green e SEP.

Assim como ocorrido na primeira simulação, o algoritmo de controle do IBS ao identificar um FOC maior que 100% chamou a função de rejeição de carga. Esta por sua vez, verificou que o módulo da diferença entre as potências das cargas RL, VSI e CSI eram inferiores a 100VA, portanto, a seleção das cargas para transferência de barra foi realizada a partir da técnica de identificação de cargas, que nesse caso específico, selecionou as cargas não-lineares para serem comutadas.

Deve-se lembrar que a ordem de prioridade de cargas a serem rejeitadas da barra Green é: VSI, CSI, RL e R, respectivamente. Sendo assim, a carga VSI foi transferida primeiro para a barra SEP, porém como o valor do FOC permaneceu superior a 100%, a função de rejeição de carga selecionou a CSI como a segunda carga a ser transferida para barra SEP. A Figura 28 (d) mostra os instantes em que ocorreram as comutações de barras para cargas VSI e CSI.

Na Figura 28 (c) é possível avaliar as variações no valor do FOC que ocorreram ao longo dessa simulação. Novamente, constata-se que a lógica de controle do IBS sempre busca a manutenção do FOC da fonte renovável próximo a 100% ou 1 p.u., evidenciando mais uma vez o compromisso do IBS em manter as 4 cargas da microrrede alimentadas, preferencialmente, pela fonte de energia renovável.

Entretanto, o principal objetivo dessa simulação foi comprovar que a técnica de identificação de carga utilizada nesse trabalho é capaz de distinguir os dois tipos de cargas não-lineares presentes na microrrede do ambiente computacional.

A Figura 29 apresenta o nível lógico das 4 chaves estáticas de transferência do conversor IBS durante a execução dessa segunda simulação. Inicialmente, todas as cargas começaram conectadas na barra Green (chave principal igual a 1). Com o aumento no valor do FOC as cargas VSI e CSI foram comutadas para a barra SEP (chave complementar igual a 1). Nas Figuras 29 (c) e (d) são apresentados os instantes da mudança de estado lógico das chaves estáticas que controlam a seleção de barras para as cargas não-lineares.

Observa-se também na Figura 29 o tempo morto entre a abertura e fechamento das chaves estáticas principal e complementar das cargas VSI e CSI. Esse tempo ocorre devido a lógica de abertura de chave no zero de corrente e fechamento no zero de tensão.

Figura 28 - Comutação das VSI e CSI para a barra SEP.

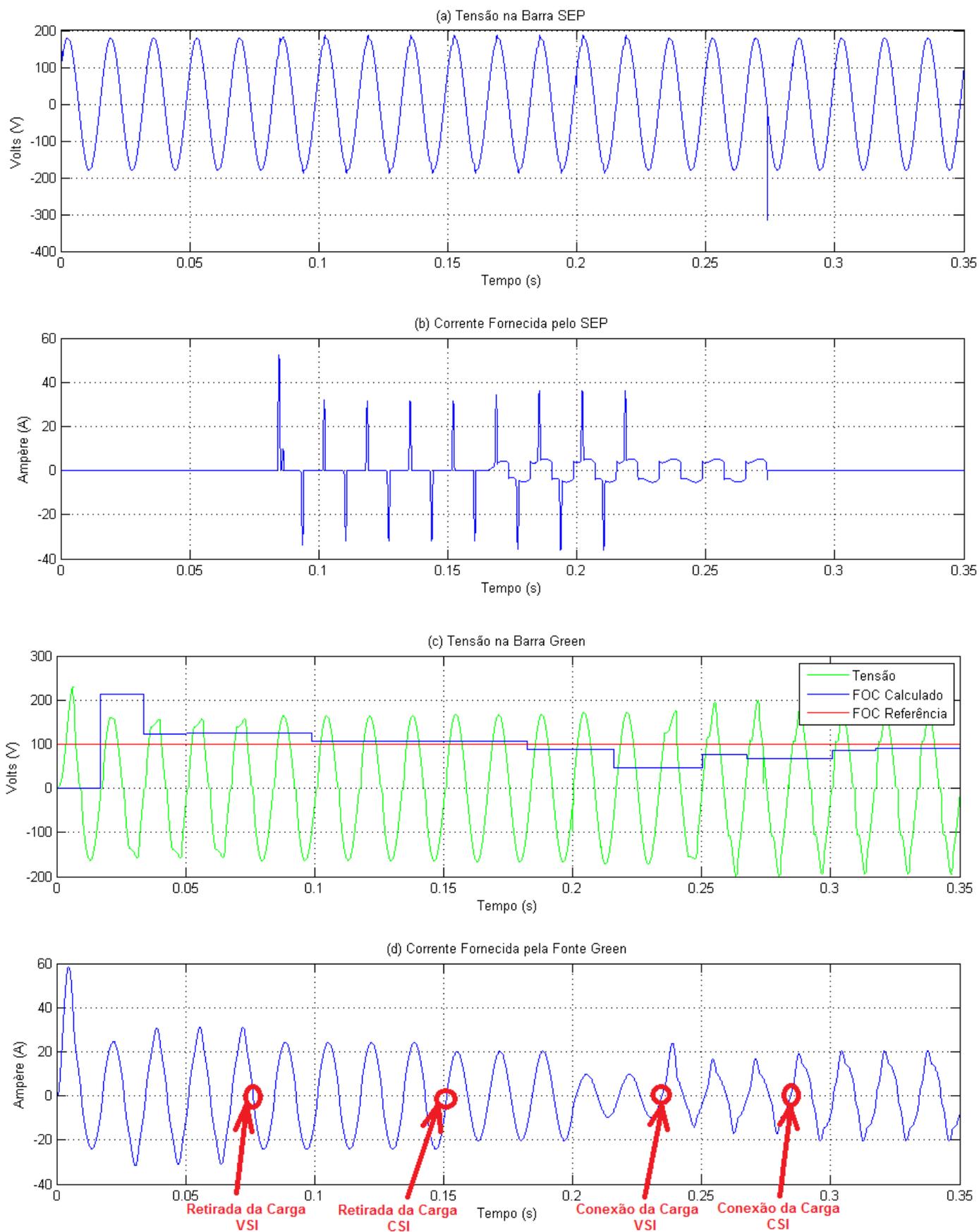
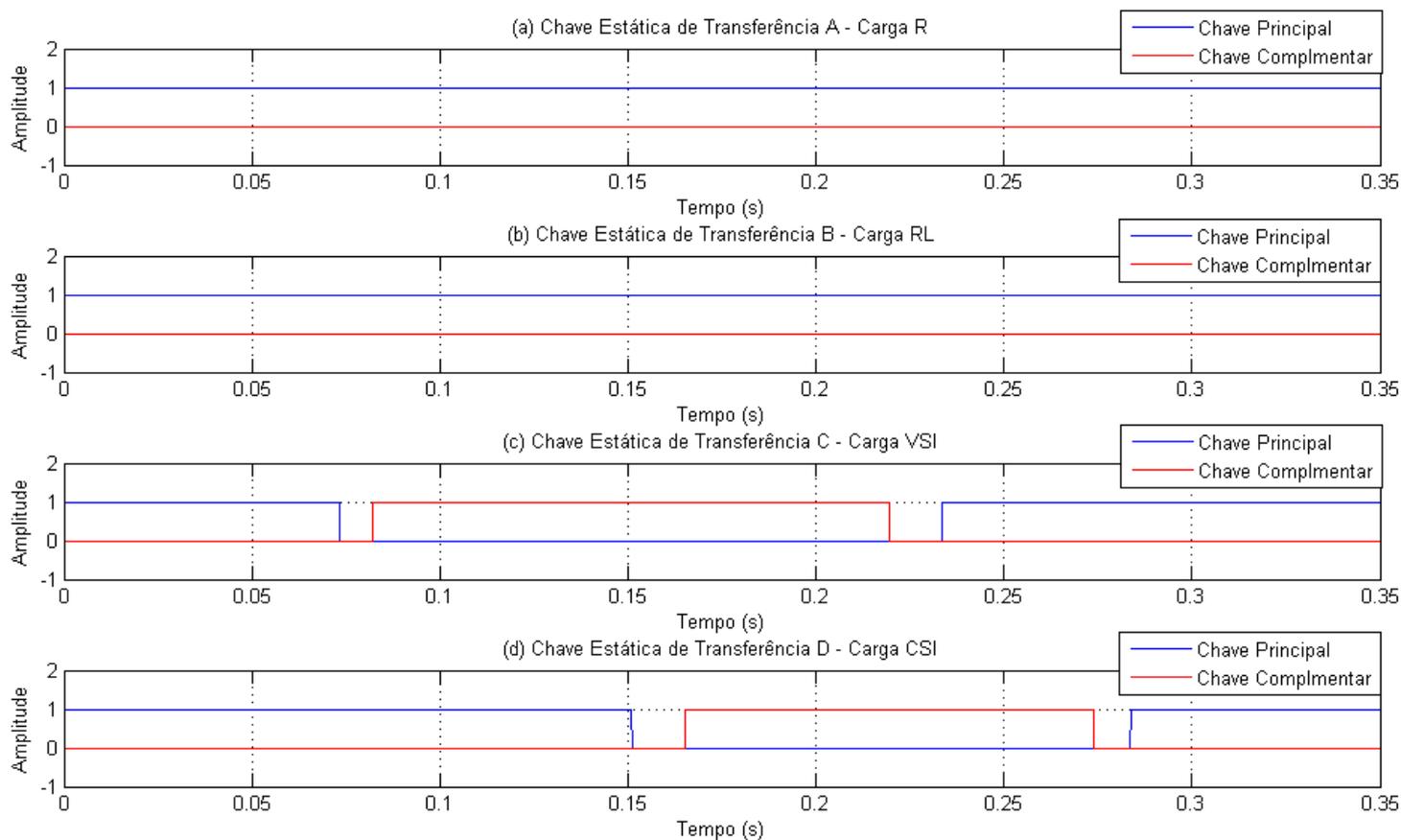


Figura 29 - Estado das 4 chaves estáticas de transferência. (a) Chave estática de transferência da carga R. (b) Chave estática de transferência da carga RL. (c) Chave estática de transferência da carga VSI. (d) Chave estática de transferência da carga CSI.



4.2.3 – Aumento de potência na carga VSI e comutação das cargas CSI e RL:

Na terceira e última simulação, a carga VSI demandou uma potência 1300VA. O FOC da fonte renovável atinge o valor de 130%, forçando a lógica de controle do IBS retirar duas cargas da barra Green. Nesse caso, o algoritmo teve que selecionar para transferência de barras duas entre as três cargas (R, RL e CSI).

Como a carga CSI possui uma prioridade maior para ser rejeitada da barra Green, essa foi retirada logo nos primeiros ciclos da simulação. Após a remoção dessa carga, o algoritmo identificou que o FOC permaneceu maior do que 100% ou 1 *p.u.*, e logo houve uma segunda transferência de carga para a barra SEP. Como a carga RL tem prioridade para ser rejeitada em relação a carga R, essa foi retirada da barra Green.

A Figura 30 apresenta as formas de onda da tensão e corrente nas barras Green e SEP. Na Figura 30 (c) é possível avaliar o valor do FOC da fonte renovável durante o período da simulação. Mais uma vez, deve-se destacar o trabalho da lógica de controle do IBS para manutenção do maior valor possível do FOC na barra Green, mostrando assim a eficiência do IBS no controle do balanço entre carga e geração da fonte renovável.

A Figura 30 (d) mostra os instantes em que as cargas CSI e RL são comutadas entre as barras Green e SEP. Esse resultado mostra a capacidade do conversor IBS em distinguir os tipos de cargas existentes na microrrede. Nessa simulação específica, é importante ressaltar a capacidade do conversor em distinguir a carga RL da R, mostrando que os atributos fator de potência (*FP*), potência instantânea ($p(t)$) e fator de crista de corrente (*CFi*) são suficientes para a classificar os tipos de cargas.

Outro resultado importante que deve ser destacado nessa simulação, é a característica do conversor IBS em manter na fonte renovável cargas com maior demanda potência, mesmo que essas cargas sejam não-lineares. A opção por trabalhar com essa lógica visa garantir o maior fator de ocupação de cargas possível para a fonte renovável da microrrede.

A Figura 31 apresenta o nível lógico das 4 chaves estáticas de transferência do conversor IBS para essa simulação. Verifica-se pelas Figuras 31 (b) e (d) que somente as chaves que comandam as cargas CSI e RL tiveram um comutação de estado, comprovando assim a correta operação do conversor IBS.

Figura 30 - Transferência das cargas CSI e RL para a barra SEP.

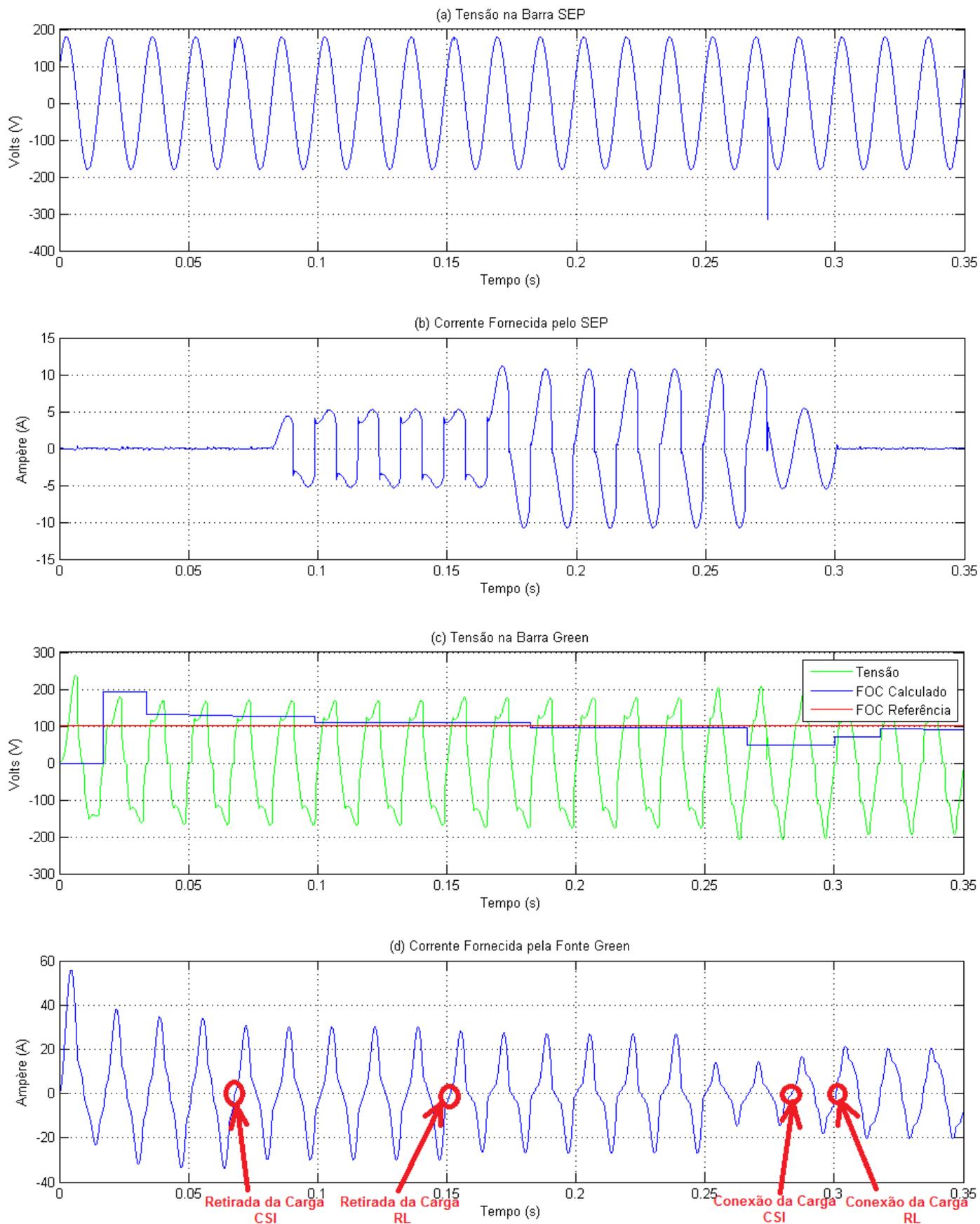
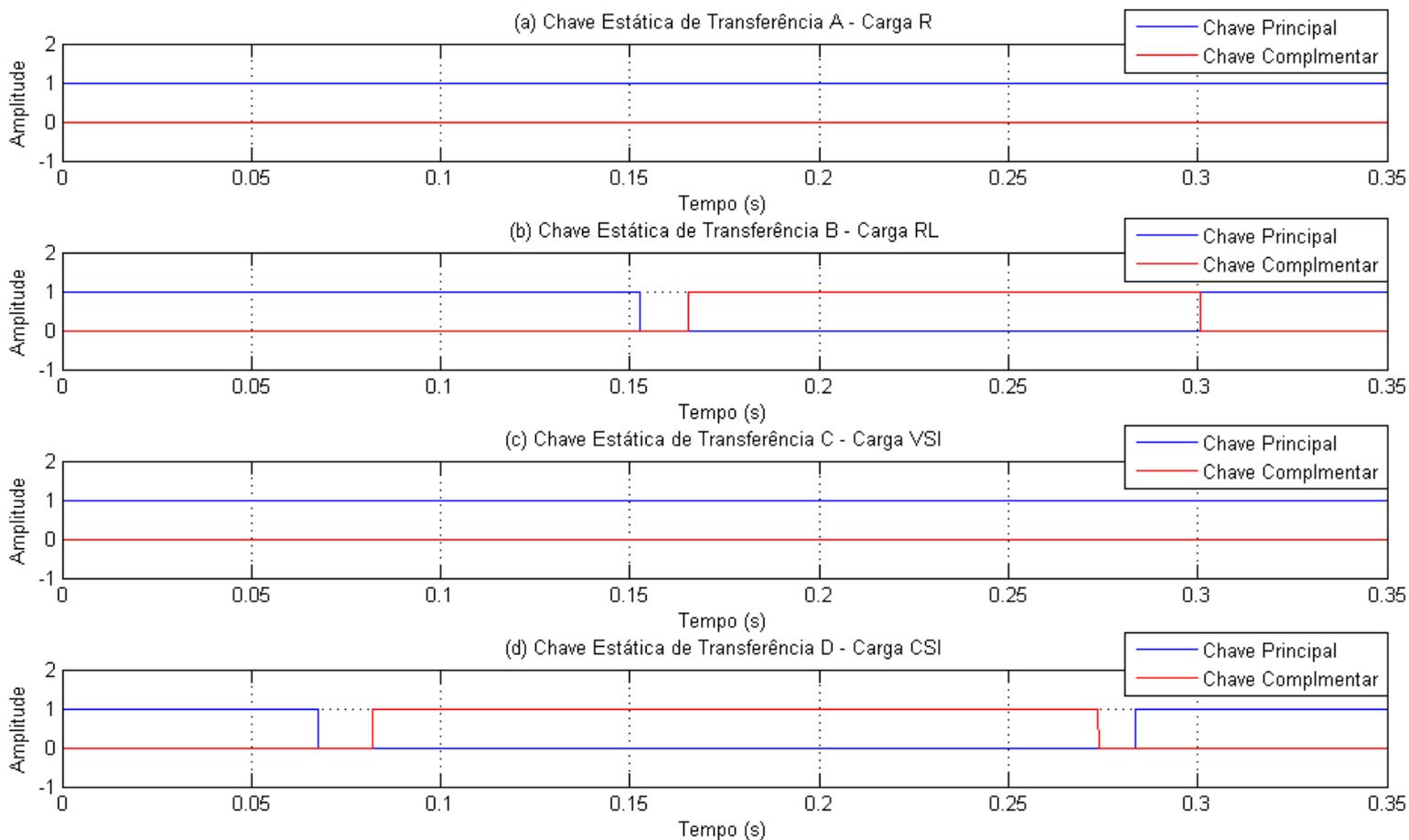


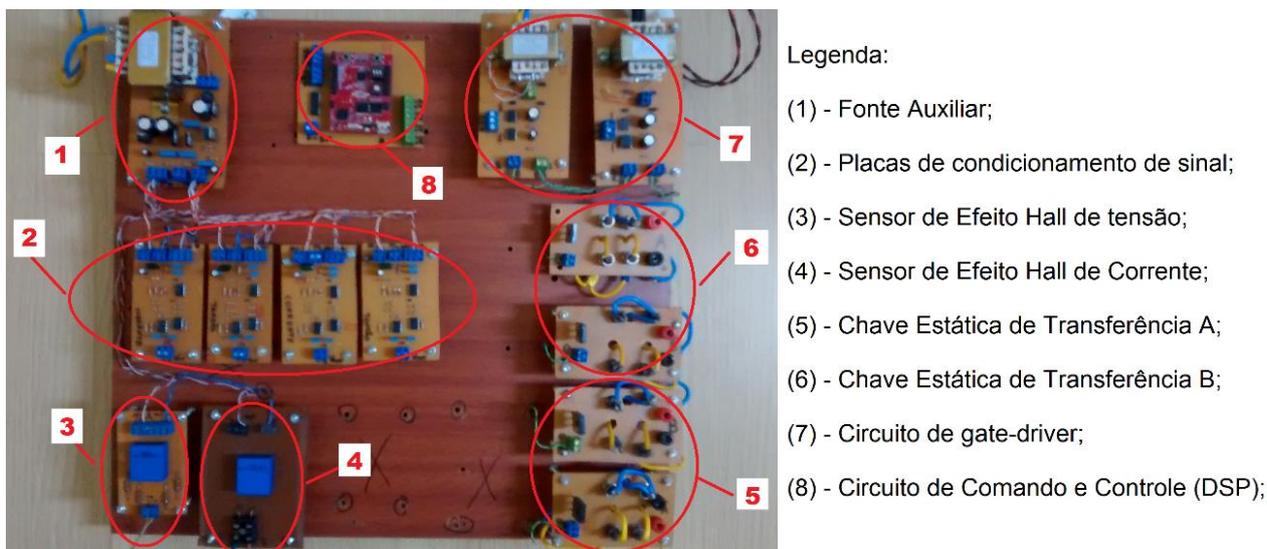
Figura 31 - Estado das 4 chaves estáticas de transferência. (a) Chave estática de transferência da carga R. (b) Chave estática de transferência da carga RL. (c) Chave estática de transferência da carga VSI. (d) Chave estática de transferência da carga CSI.



4.3 – Resultados Obtidos com o Protótipo do Conversor IBS

A Figura 32 apresenta os circuitos eletrônicos que compõem o conversor estático IBS. Pela imagem pode-se observar que a versão física do protótipo é composta por apenas duas chaves estáticas de transferência, que difere bastante em relação ao modelo do conversor simulado (ver Figura 25). Essa diminuição no número de chaves visou a redução dos custos com a montagem do IBS, tendo em vista que componentes como IGBTs e HCPL 3120 possuem um alto custo no mercado.

Figura 32 - Implementação física do conversor estático IBS.

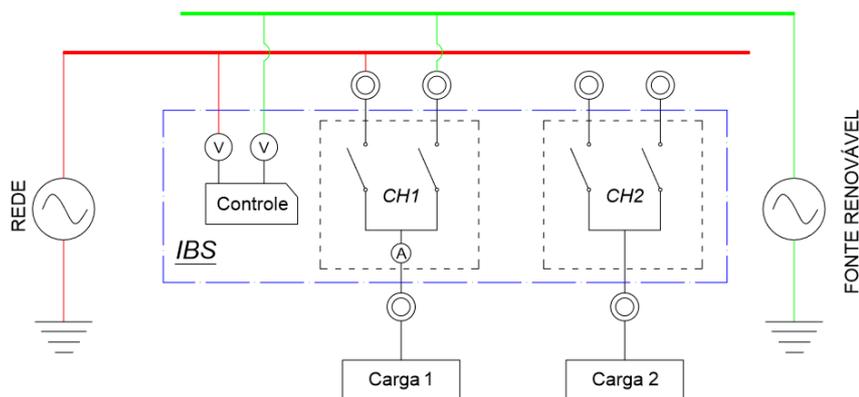


Na Figura 33 é apresentado o esquema elétrico do conversor IBS montado em laboratório para a realização dos testes. Devido à falta de um sensor de efeito Hall de corrente para a chave estática de transferência B, os ensaios funcionais realizados no conversor IBS se limitaram a:

1. Validação das interrupções para amostragem dos sinais de tensão e corrente condicionados;
2. Testes de detecção de zero crossing nos sinais de tensão e corrente;
3. Execução de comandos de abertura e fechamento das Chaves Estáticas CA para cargas R e RL;
4. Realização de uma transferência de carga com a Chave Estática Transferência A em um sistema isolado e não sincronizado.

Nos próximos tópicos desse texto serão apresentados os resultados obtidos para cada um dos 4 (quatro) ensaios funcionais executados no conversor IBS.

Figura 33 - Diagrama do protótipo montado em laboratório.

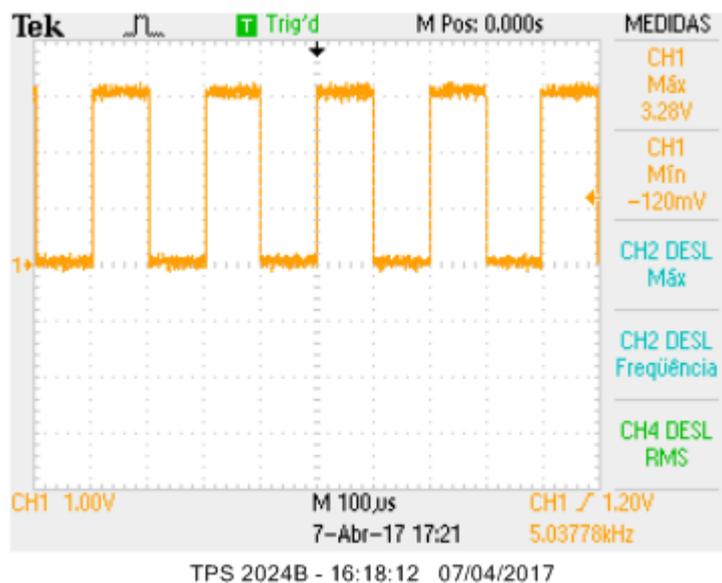


4.3.1 – Validação das Interrupções para amostragem dos sinais de Tensão e Corrente:

Como a frequência fundamental da rede é 60Hz e o número de amostras dos sinais de tensão e corrente utilizadas nos cálculos é 167, o algoritmo de medição do IBS foi ajustado para gerar a cada 100 μ s uma interrupção no Timer_0 do DSP para leitura dos valores instantâneos de tensão e corrente.

Para validação do correto funcionamento das interrupções no algoritmo de controle do IBS, uma saída digital do DSP (pino GPIO_0) foi programada para mudar de estado (nível lógico alto ou baixo) a cada interrupção. A Figura 34 apresenta uma onda quadrada gerada no pino GPIO_0 e monitorada no canal 1 (CH1) do osciloscópio da bancada de testes.

Figura 34 - Interrupções para medição dos sinais de tensão e corrente.



Observa-se pela Figura 34 que o período da onda quadrada é de $200\mu\text{s}$ e que meio ciclo da onda quadrada possui a duração de $100\mu\text{s}$, ou seja, esse resultado comprova que o pino GPIO_0 alterna o nível lógico da saída digital a cada $100\mu\text{s}$, validando assim o correto ajuste do função de interrupção no algoritmo de controle do conversor IBS.

Para garantir a leitura das 167 amostras de um sinal senoidal de tensão ou corrente, o comando de leitura dos registradores [ADCResult_x()] das entradas analógicas do DSP, foram ajustadas para ocorrer somente quando há a chamada da função de interrupção do Timer_0. A programação da leitura das entradas analógicas dessa maneira, assegura que a cada $100\mu\text{s}$ uma amostra do sinal de tensão ou corrente é medido pelo DSP, totalizando assim 167 amostras coletadas para um sinal cujo período é $16,67\text{ms}$.

4.3.2 – Detecção de Zero Crossing nos Sinais de Tensão e Corrente:

O ensaio de funcionamento para detecção do zero crossing nos sinais de tensão e corrente foram realizados com a utilização das placas de condicionamento de sinal.

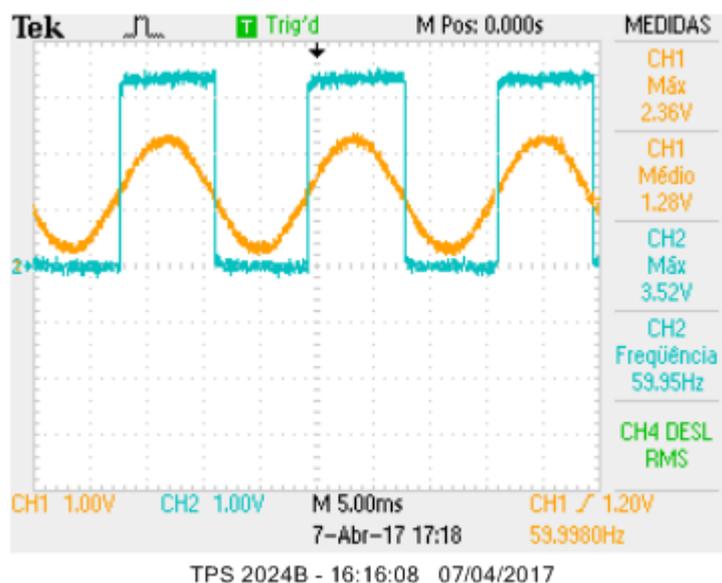
Os testes consistiram em conectar um sensor de efeito Hall de tensão em paralelo com uma fonte alternada e um sensor de efeito Hall de corrente em série com uma carga resistiva de 36Ω alimentada com uma tensão de $110V_{rms}$. Os sinais de saída dos sensores foram aplicados na entrada das placas de condicionamento de sinal. A Figura 35

apresenta a tensão da rede condicionada, canal 1 (CH1) do osciloscópio, e aplicada a entrada analógica (ADCINA0) do DSP.

Para validação da função de detecção de zero crossing no sinal de tensão, uma saída digital do DSP (pino GPIO_1) foi ajustada para alternar o nível lógico a cada passagem por zero do sinal medido na entrada ADCINA0. A Figura 35 apresenta uma onda quadrada com frequência de $59,95Hz$ medida pelo canal 2 (CH2) do osciloscópio. Observa-se pela imagem que a onda quadrada vai para o nível lógico alto ($3,52V$) sempre que o sinal senoidal cruza o eixo das abscissas com coeficiente de inclinação positivo. Quando o sinal senoidal cruza o eixo das abscissas com coeficiente de inclinação negativo, a onda quadrada vai para o nível lógico baixo ($0V$). Esse resultado obtido com a geração da onda quadrada comprova a capacidade do algoritmo de controle do *IBS* em detectar o zero crossing nos sinais de tensão.

Figura 35 - CH1 - Sinal de saída na placa de condicionamento (tensão).

CH2 – Onda quadrada de detecção de zero crossing.



A Figura 36 apresenta a detecção de zero crossing na corrente que flui pela carga resistiva de 36Ω . O sinal de corrente condicionado foi medido pelo canal 3 (CH3) do osciloscópio e aplicado a entrada analógica (ADCINA1) do DSP. Assim como realizado para a detecção do zero crossing de tensão, uma saída digital do DSP (pino GPIO_2) foi programada para gerar uma onda quadrada sempre o sinal de corrente cruzar o eixo das abscissas. A onda quadrada de detecção do zero crossing de corrente foi medida no canal 4

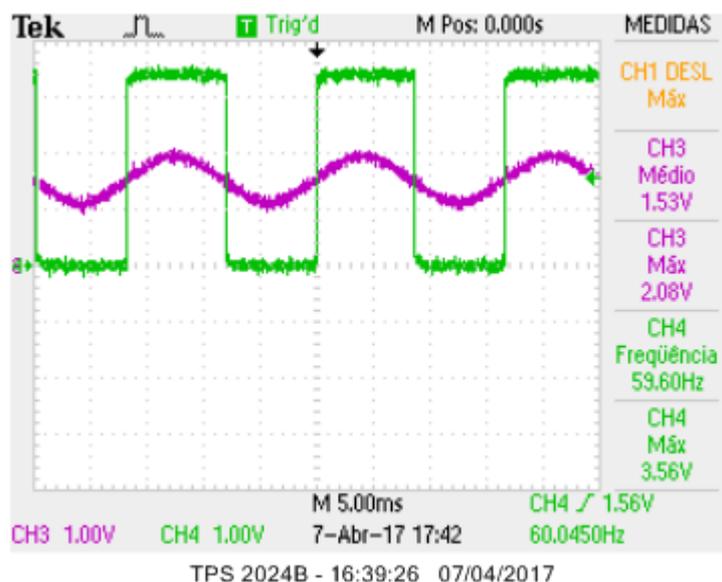
(CH4) do osciloscópio e possui a frequência de 59,60Hz, podendo ser visualizada na Figura 36.

A validação da função de detecção de zero crossing mostra que o algoritmo de controle do conversor IBS é capaz de abrir e fechar as Chaves Estáticas de Transferência sem ocasionar sobretensões nos semicondutores das chaves e nas cargas do sistema.

Além disso, a correta detecção de zero crossing nos sinais de tensão e corrente, comprova a capacidade do algoritmo de controle do IBS em realizar a leitura dos sinais analógicos aplicados as entradas do DSP.

Figura 36 - CH3 - Sinal de saída na placa de condicionamento (corrente).

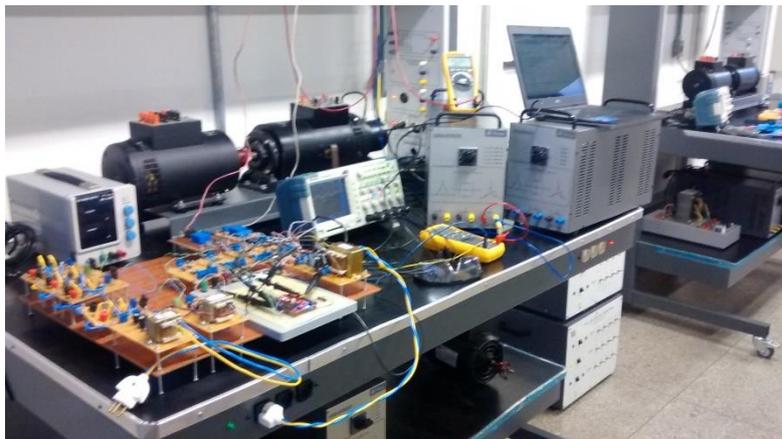
CH4 – Onda quadrada de detecção de zero crossing na corrente.



4.3.3 – Testes de Comando das Chaves Estáticas CA:

Antes de testar a operação da chave estática de transferência A, realizou-se em laboratório ensaios de operação das 4 chaves estáticas CA alimentando cargas resistivas e indutivas. A execução desses ensaios de funcionamento visou identificar a capacidade do conversor IBS em comandar as chaves estáticas CA, sendo esses ensaios uma etapa fundamental para validação da operação do protótipo numa microrrede. A Figura 37 apresenta a montagem do protótipo do IBS em bancada de testes.

Figura 37 - Bancada montada para realização dos testes com o conversor IBS.



O ensaio de operação das 4 chaves estáticas CA consistiu em conectar as mesmas entre uma fonte de tensão alternada e uma carga (R ou RL). Além disso, no circuito foram conectados os sensores de efeito Hall de tensão e corrente para detecção do zero crossing dos sinais medidos.

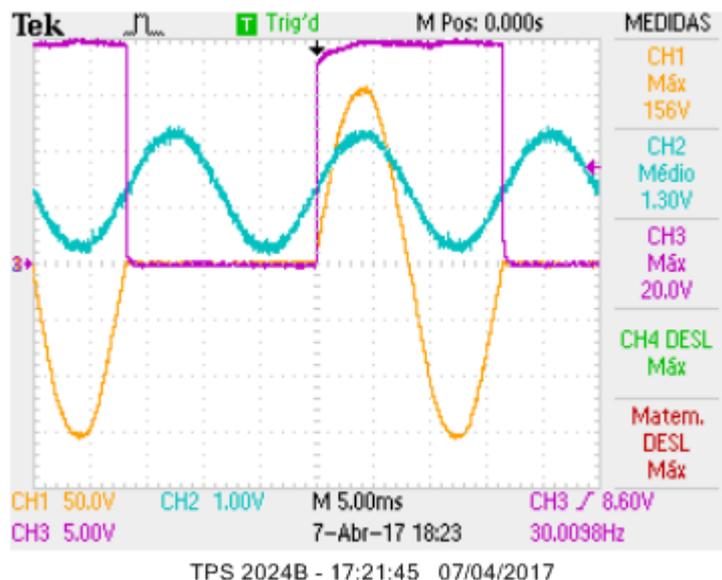
Como já informado no tópico anterior desse texto, a abertura das chaves estáticas no zero crossing de corrente ou de tensão evita a ocorrência de sobretensões ou sobrecorrentes nos componentes do conversor IBS. Essa medida, além de proteger o protótipo, protege as cargas e as barras da microrrede contra transitórios de manobra.

Tendo em vista essa importância do algoritmo de zero crossing para operação do IBS, alterou-se alguns parâmetros de operação da função zero crossing utilizada nos testes da seção 4.3.2, para abrir ou fechar o circuito de carga um ciclo após a realização do comando de fechamento ou abertura.

A Figura 38 apresenta os resultados obtidos para as chaves estáticas CA com carga resistiva. Nessa imagem são apresentados os seguintes sinais:

- Canal 1 (CH1) – tensão nos terminais da carga;
- Canal 2 (CH2) – sinal de tensão da fonte alternada condicionado;
- Canal 3 (CH3) – medição do pulso de comando entre gate e emissor do IGBT das chaves estáticas CA;

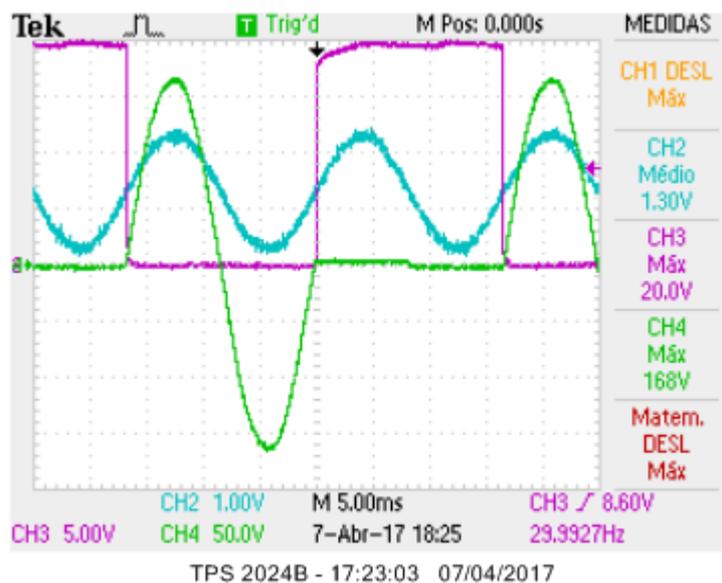
Figura 38 - Sinais medidos para as chaves estáticas CA operando com carga puramente Resistiva (R).



Deve-se observar na Figura 38 que a tensão nos terminais da carga é $110V_{rms}$ quando o sinal gate-emissor no IGBT é igual a 20V.

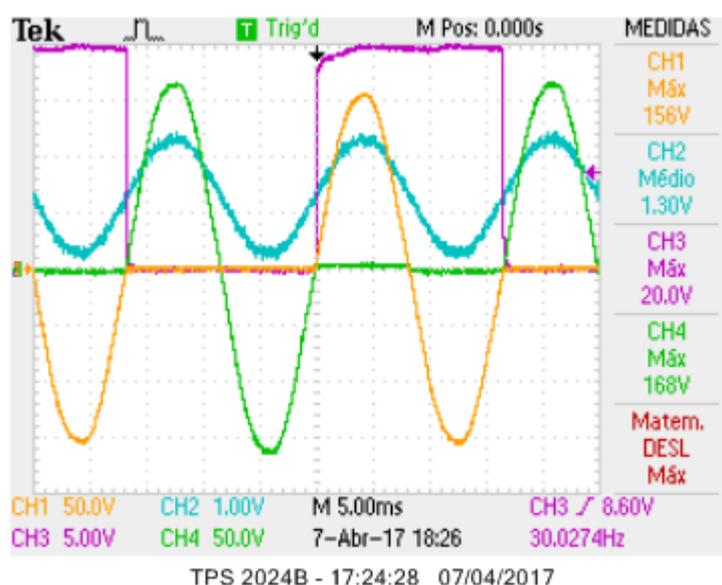
A Figura 39 apresenta a forma da tensão nos terminais da chave estática CA quando a mesma está em modo de bloqueio, ou seja, quando a tensão gate-emissor é igual a 0V. Na imagem, a tensão entre os terminais da chaves estática CA é medida pelo canal 4 (CH4) do osciloscópio.

Figura 39 - Tensão nos terminais da Chave Estática CA quando em bloqueio.



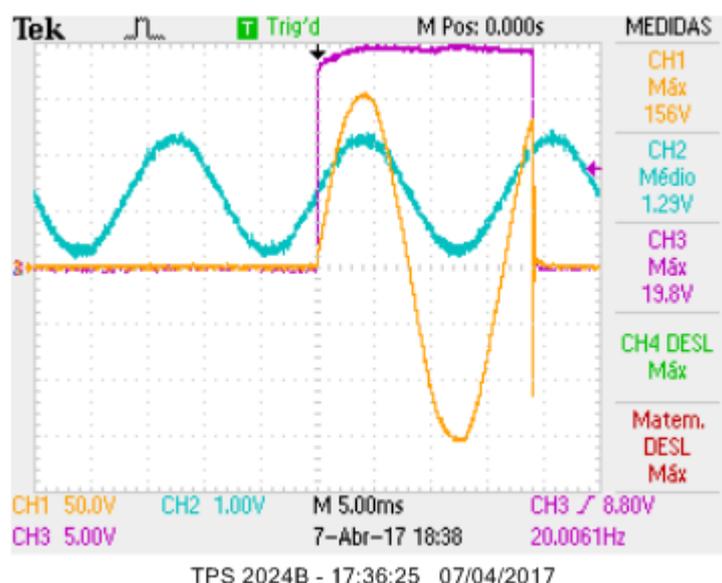
A Figura 40 apresenta uma compilação dos resultados apresentados nas duas figuras anteriores. Pode-se observar que soma do ciclo de bloqueio mais o ciclo de condução da chave estática, forma a onda senoidal completa da tensão de alimentação do circuito, evidenciando assim a operação da chave estática CA com carga puramente resistiva (R).

Figura 40 - Tensão nos terminais da Chave Estática CA quando em bloqueio e nos terminais da carga quando em condução.



Além do teste com carga resistiva, fez-se também um teste de abertura e fechamento das chaves estáticas CA com carga de perfil indutivo (RL). Como se pode ver na Figura 41, o algoritmo de controle do IBS é capaz de detectar a passagem por zero da tensão e realizar o fechamento da chave. Ao identificar o zero crossing de corrente, o algoritmo abre a chave estática. Observa-se também, que o controle do IBS mantém a chave fechada por um tempo superior a um ciclo, quando comparado a operação com carga resistiva (ver Figura 38). Esse resultado é obtido devido a defasagem angular existente entre tensão e corrente para cargas RL, comprovando assim a capacidade do IBS em operar tanto com cargas resistivas quanto com cargas de fator de potência indutivo.

Figura 41 - Tensão nos terminais da carga RL (indutiva).



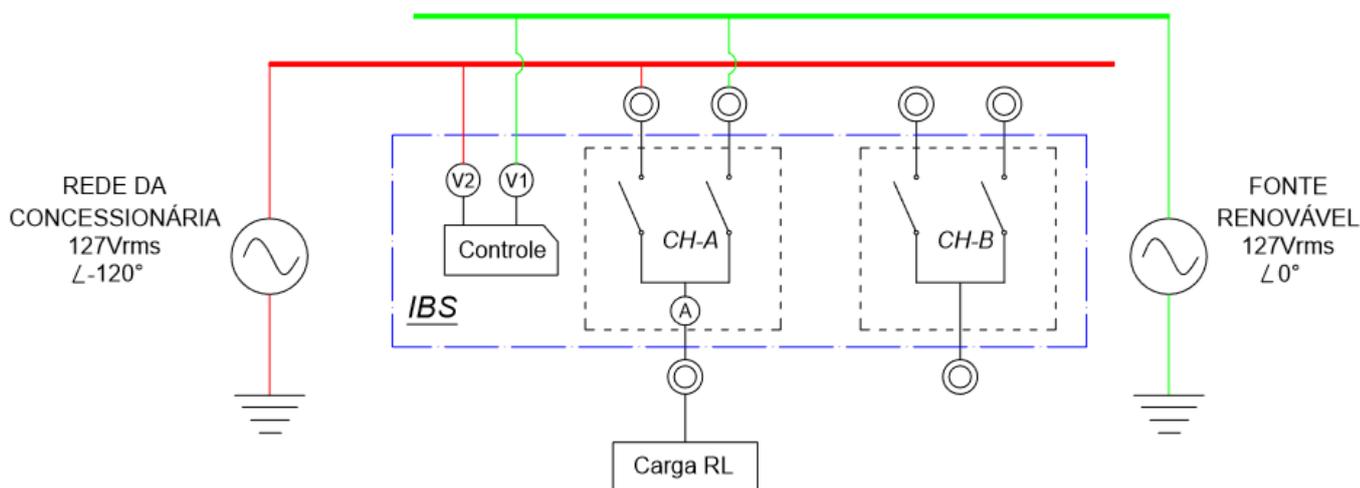
4.3.4 –Transferência de Carga em um Sistema Isolado e não sincronizado:

A realização do teste de transferência de carga entre dois sistemas isolados, teve como objetivo mostrar que protótipo do conversor IBS possui a capacidade de transferir cargas de uma microrrede entre a barra de energia renovável e a barra da concessionária.

A Figura 42 apresenta o esquema ligação do conversor IBS utilizado no teste de transferência de carga. A chave estática de transferência utilizada nesse ensaio foi a Chave A (CH-A), e uma carga indutiva (RL) foi conectada ao terminal de saída dessa chave. Além disso, o sinal de tensão das fontes alternadas, utilizadas na simulação do sistema Isolado e

não sincronizado, foram ajustadas para ter uma defasagem angular de 120° entre suas formas de onda.

Figura 42 - Diagrama elétrico do conversor IBS montado em laboratório para o teste de transferência de carga.



Ao entrar em operação o conversor IBS verifica o sinal de tensão nas barras e conecta automaticamente as cargas da microrrede na fonte de energia renovável. Para transferir uma carga para a barra da concessionária, o controle do conversor abre a chave estática principal e fecha a chave estática complementar. Entre o processo de abertura e fechamento das chaves, há uma etapa intermediária onde as duas chaves estáticas ficam abertas. Essa etapa visa garantir que não haja paralelismo entre as fontes, evitando assim a ocorrência de curto-circuito entre as fontes.

A Figura 43 mostra o processo de transferência de carga a partir da chave estática de transferência A (CH-A). Inicialmente a carga RL está conectada na fonte renovável (Figura 43 (a)). Após alguns ciclos ocorre a abertura da chave estática principal, dando início ao processo intermediário da transferência de carga (Figura 43 (b)). Nessa etapa intermediária deve se observar que as chaves estáticas, principal e complementar, estão abertas o que evita o paralelismo entre as fontes. A conclusão da transferência ocorre quando o conversor fecha a chave complementar e conecta a carga RL na rede da concessionária (Figura 43 (c)). O retorno da carga para barra de energia renovável é realizado através do processo inverso, ou seja, abre da chave estática complementar, obtém-se a etapa intermediária da transferência e por fim fecha a chave estática principal.

A Figura 44 apresenta a medição dos seguintes sinais: tensão da rede da concessionária (CH1), tensão da fonte de energia renovável (CH2), sinal de comando da

chave estática complementar (CH3) e sinal de comando da chave estática principal (CH4). Deve-se observar que a tensão da concessionária está 120° adiantada em relação a tensão da fonte renovável.

Verifica-se também pela Figura 44 que os sinais de comando para fechamento das chaves estáticas principal e complementar ocorrem somente na passagem por zero da tensão das barras. Além disso, durante o processo de abertura e fechamento das chaves os sinais de comando possuem valor igual a 0V, evidenciando assim a etapa intermediária do processo de transferência de carga.

Na Figura 45 o sinal de comando da chave principal é desligado para monitoramento da forma de onda da corrente da carga RL (canal CH4). Como resultado observa-se que a corrente da carga RL fica um ciclo e meio ligada na fonte renovável, e apenas um ciclo na rede da concessionária. Identifica-se também que a forma de onda da corrente da carga RL possui valor igual a 0A durante o processo de transferência de barra, comprovando assim a etapa intermediária da manobra de transferência.

Figura 43 - Etapas de uma transferência de carga. (a) Carga conectada na Fonte Renovável. (b) Etapa intermediária do processo de transferência de Carga. (c) Carga conectada na Rede da Concessionária.

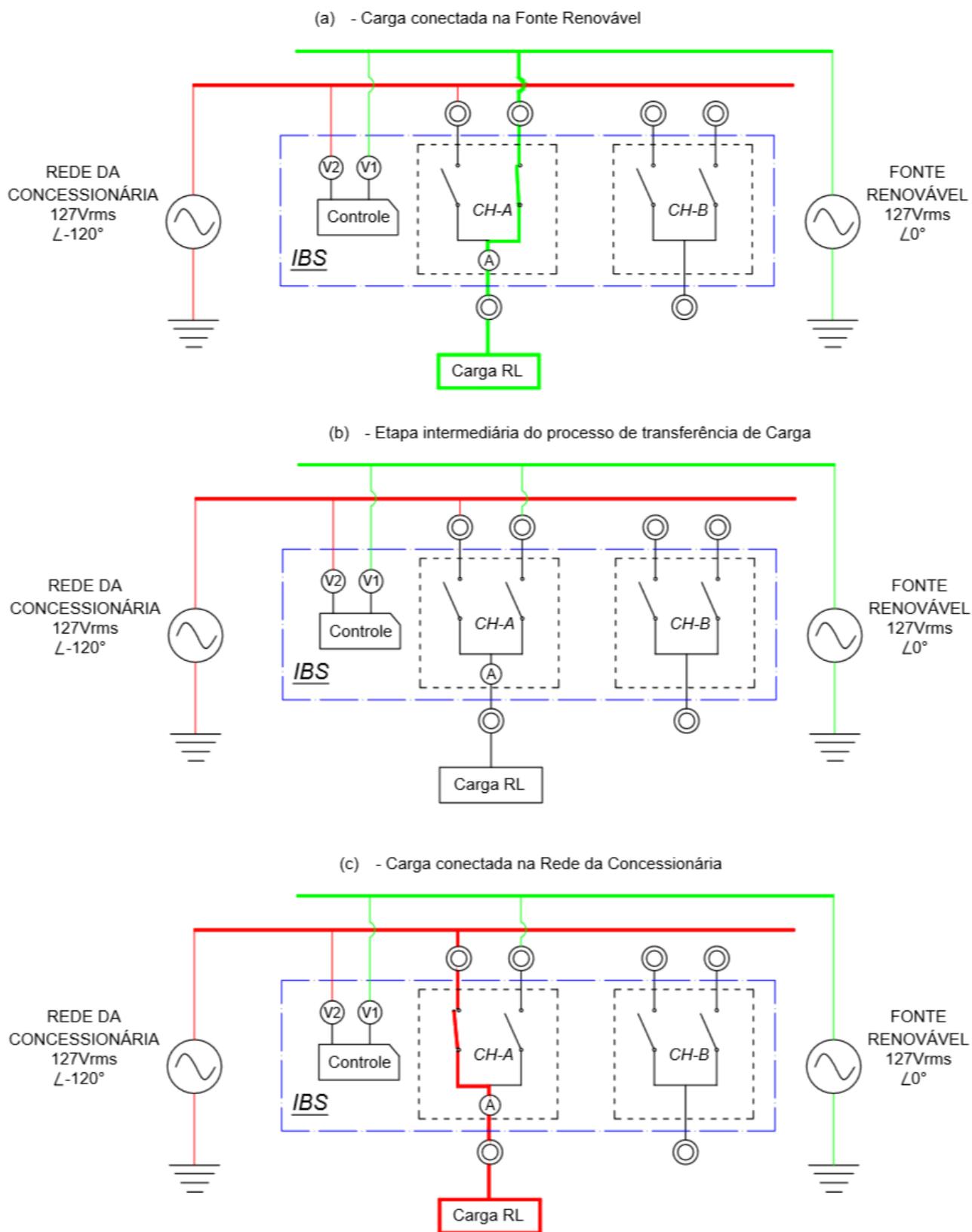


Figura 44 - (CH1) - Tensão da rede da concessionária. (CH2) - tensão da fonte de energia renovável. (CH3) - Sinal de comando da chave estática complementar. (CH4) - Sinal de comando da chave estática principal.

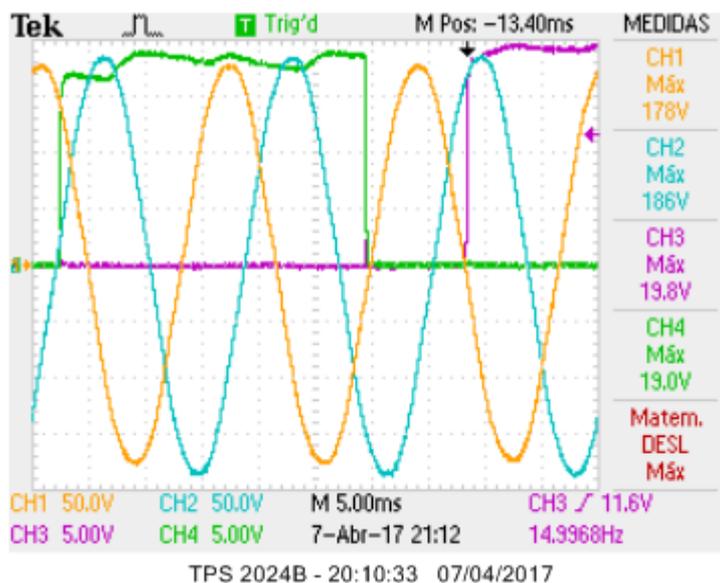
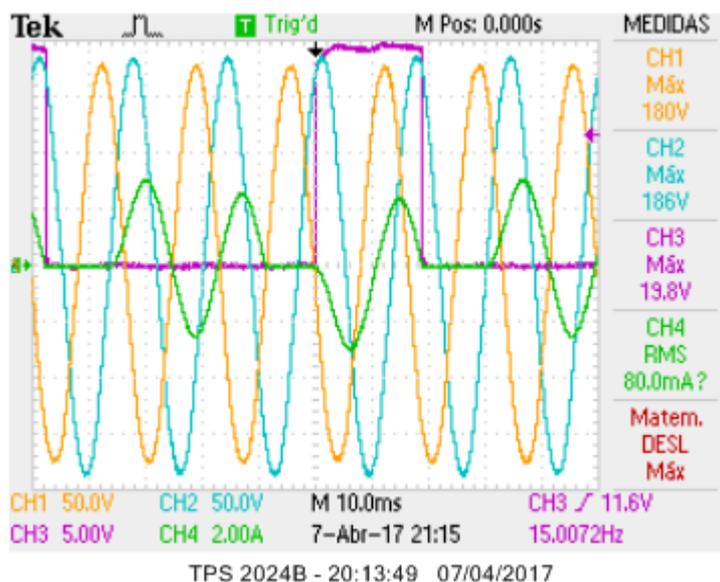


Figura 45 - (CH1) - Tensão da rede da concessionária. (CH2) - Tensão da fonte de energia renovável. (CH3) - Sinal de comando da chave estática complementar. (CH4) - Corrente da carga RL.



Outro resultado importante a ser observado na Figura 45 é a inexistência de sobretensões ou sobrecorrente devido ao chaveamento de carga indutiva. Esse resultado, comprova mais uma vez a eficácia do algoritmo de zero crossing implementado na unidade de controle do IBS, cuja função é fechar as chaves estáticas no zero de tensão e abrir no zero de corrente.

5 – Considerações Finais

5.1 – Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento do conversor estático IBS, cujo algoritmo de controle foi desenvolvido para microrredes que operam em modo isolado.

A partir dos resultados obtidos com as simulações do conversor foi possível constatar a eficiência do mesmo na identificação e seleção de cargas para a transferência entre a barra de energia renovável e o SEP. Além disso, pode-se verificar que o IBS opera buscando o máximo despacho de potência das fontes limpas o que garante ao sistema maior eficiência energética.

A capacidade de controlar a configuração da rede local e o algoritmo inteligente de monitoramento, confere ao IBS as características desejadas de operação nas microrredes, contribuindo assim para o desenvolvimento desses novos sistemas de fornecimento de energia.

Devido ao elevado custo com a aquisição de componentes eletrônicos, o protótipo físico não pode ser construído de modo idêntico à versão simulada. Entretanto, os resultados apresentados evidenciam o funcionamento dos circuitos que compõem o conversor estático IBS.

Portanto, a proposta de desenvolvimento de um conversor estático para controle das microrredes foi atingida e comprovada a partir dos dados simulados. Para o protótipo físico os componentes selecionados e os circuitos elaborados se mostraram corretos para a operação do equipamento, restando assim a necessidade de concluir a montagem para validação de funcionamento do IBS em uma microrrede com mais de uma carga.

5.2 – Sugestão para Trabalhos Futuros

O conversor estático IBS é modular e pode ser utilizado em outras aplicações, como:

- Microrredes que operam conectadas ao SEP: para essa aplicação é necessário alterar o algoritmo de controle do IBS;
- Comutação eletrônica de *taps*: nesse caso há a necessidade de alterar a lógica e o esquema de operação das chaves estáticas;
- Chave estática de transferência (STS): nessa aplicação deverá ser implementado uma técnica de detecção de distúrbios na tensão da rede;

Referências Bibliográficas

LASSETER, R. H. **MicroGrids, s.1.: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions**. IEEE, 2002.

LASSETER, R. H. **Microgrids and Distributed Generation**. IEEE, 2007.

CHOWDBURRY, S., CHOWDBURRY, S. P., CROSSLEY, P. **Microgrids and Active Distribution Networks**. London. IET, 2009.

AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000. p. 462 – 476.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência – Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1999. p. 558 – 570.

DEUS, M. H. A., **Chave estática de transferência, estudo e soluções de casos, focados na continuidade do fornecimento e aumento da confiabilidade do sistema**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2011.

RODRIGUES, M. V. M., **Controlador multimalhas para inversor monofásico e chave estática de transferência aplicados em fontes ininterruptas de energia do tipo passive Standby**. Dissertação de Mestrado, Unversidade Estadual de Londrina, Londrina-PR, Brasil, 2016.

REIS, M.S., Qualificação de Doutor em Engenharia Elétrica: **Implementação de um Regulador de Tensão com Comutador Eletrônico de Tap**, 2013. Laboratório de Eletrônica de Potências e Média Tensão, COPPE/UFRJ. Orientador: Prof. Mauricio Aredes, Dr. Ing.

ABNT, **NBR11809 – Reguladores de Tensão**, 1992.

FAIZ, J. and SIAHKOLAH, B., **Differences between conventional and electronic tap changers and modifications of controller**, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 21, pp. 1342-1349, 2006.

LEM. **Voltage Transducer LV 25-P**. Data de acesso: 16 de março de 2017. Disponível em: <http://www.lem.com/docs/products/lv_25-p.pdf>.

LEM. **Current Transducer LA 25-NP**. Data de acesso: 16 de março de 2017. Disponível em: <<http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf>>.

TEXAS INSTRUMENTS, **User's Guide: LAUNCHXL-F28027 C2000 Piccolo LaunchPad Experimenter Kit**. Data de acesso: 05 de janeiro de 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/spruhh2a/spruhh2a.pdf> >.