

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

GIOVANNA GOMES ANDRADE

**CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO PARA
CONTROLAR O ELO CC DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

VITÓRIA
2022

GIOVANNA GOMES ANDRADE

**CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO PARA
CONTROLAR O ELO CC DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Giovanna Gomes Andrade, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Prof. Dr. Ricardo Carminati de Mello
Professor da disciplina

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Orientador

Giovanna Gomes Andrade
Aluna

VITÓRIA
2022

GIOVANNA GOMES ANDRADE

**CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO PARA
CONTROLAR O ELO CC DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna Giovanna Gomes Andrade, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenharia Eletricista.

Aprovada em 13 de dezembro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dr. Thiago Silva Amorim
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedicado à Claudiane Gomes, minha heroína.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos membros do departamento e colegiado do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo. Agradeço também aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite, em especial, o Professor Walbermark Marques dos Santos por suas palavras de incentivo.

E principalmente, agradeço ao meu orientador, Professor Lucas Frizera Encarnação, por me apresentar esse tema e me guiar durante esse período, com tanta atenção e paciência.

RESUMO

A eletrônica de potência é usada em muitas aplicações desde sua criação. A demanda da indústria por eficiência fez com que muito fosse estudado nessa área. Controladores convencionais, lineares e por histerese, são o estado da arte para conversores de energia elétrica, porém tem alguns requisitos que podem ser mais difíceis de atingir utilizando estes controles. Com o desenvolvimento dos microprocessadores, surgiram controles mais sofisticados e um deles é o controle preditivo baseado em modelo. Este controle tem características que o faz ser adequado para aplicações em conversores estáticos, pois o mesmo possui fácil compreensão, fácil implementação, inclui a não-linearidade, compatível com conversores multinível entre outras vantagens. Este trabalho tem como foco estudar duas formas de controle preditivo baseado em modelo para controlar o Elo CC de um retificador trifásico front-end ativo.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência. Controle Preditivo. Conversores estáticos.

ABSTRACT

Power Electronics's applications are highly requested since its born. Power Electronics is a highly studied field due to the industry's demand for efficiency. State of the art for control of Power converters, linear and hysteresis control, may be harder to include some kinds of constraints. Some new control methods emerged with the development of microprocessors, predictive control is one of them. Its characteristics makes power converters an excellent field of applications due to its easy implementation and understanding, non-linearity can be included, its compatibility with multi-level converters and others. This work evaluates two types of model predictive control strategies to control the DC-link voltage of a three-phase Active Front-End Rectifier.

Keywords: Power Electronics. Predictive Control. Static Converters. Active-Front-End Rectifier.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de Controle Clássico usando Space Vector Modulation.	15
Figura 2 - Esquema de Controle de Corrente por Histerese Trifásico	15
Figura 3 - Representação gráfica das etapas envolvidas no controle preditivo baseado em modelo.	16
Figura 4 - Retificador Front-End ativo.	17
Figura 5 - Função do modelo preditivo implementada no software simulink.	21
Figura 6 - Esquema de funcionamento do controle preditivo baseado em modelo proposto.	23
Figura 7 - Função custo implementada no software simulink.	24
Figura 8 - Primeiro passo para cálculo da referência de potência ativa implementado no software simulink.	26
Figura 9 - Cálculo da referência de potência ativa implementado no software simulink.	26
Figura 10 - Esquema de funcionamento do controle preditivo baseado em modelo proposto.	27
Figura 11 - Simulação do método de controle preditivo baseado em modelo puro.	29
Figura 12 - Simulação do método de controle preditivo baseado em modelo com integrador.	30
Figura 13 - Área em que o controle teve bom desempenho	30
Figura 14 - Referência de tensão para o elo CC e referência de potência reativa.	31
Figura 15 - Resultados da tensão no elo CC.	32
Figura 16 - Resultados de Potências do Retificador.	34
Figura 17 - Lado CA do retificador.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do retificador usados na Simulação.

28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

$v_r(t)$	Tensão instantânea sobre o resistor (V)
t	Tempo (s)
R	Valor da resistência do resistor (Ω)
$i(t)$	Corrente instantânea no elemento (A)
$v_l(t)$	Tensão instantânea sobre o indutor (V)
L	Valor da indutância do indutor (H)
$v_c(t)$	Tensão instantânea sobre o capacitor (V)
C	Valor da capacitância do capacitor (F)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO APLICADO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA	14
2.1	Aplicações de Conversores de Potência	14
2.2	Controle Convencional	14
2.3	Controle Preditivo Baseado em Modelo	16
3	MODELAGEM DO ESQUEMA DE CONTROLE PROPOSTO	19
3.1	Modelagem do Retificador	19
3.2	Controle Preditivo Baseado em Modelo para o controle do elo CC do retificador	21
4	RESULTADOS	29
5	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1 INTRODUÇÃO

Este é um projeto de graduação que aborda o tema de controle preditivo baseado em modelo (do inglês, *Model Predictive Control*) em conversores estáticos. Nele será apresentado uma avaliação de um método de controle preditivo baseado em modelo para controlar o elo CC de um retificador de *front-end* ativo.

Conversores de potência são usados para diversos tipos de aplicações, como acionamento de máquinas, conversão de energia e geração distribuída, que são de setores variados (industrial, residencial, SEP, energia renovável, transporte etc.). Devido à sua importância para várias aplicações, o tema é amplamente estudado na área acadêmica há décadas (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012).

Os conversores são compostos de dispositivos semicondutores e a evolução deles aconteceu simultaneamente. Inicialmente constituídos por diodos e mais tarde com os tiristores, que necessitavam de um circuito para regular o disparo do tiristor, começando a partir de um circuito analógico e migrando para digital com o aumento da frequência de chaveamento dos transistores (BARBI, IVO; 2006).

A teoria de controle clássica foi adaptada para conversores digitalmente controlados. O controle convencional replica os conceitos do controle analógico nos circuitos digitais, aproximando o sistema de um modelo linear e ignorando suas características não-lineares. Além do controle linear existe outro controle consolidado pelos circuitos analógicos que é o controle por histerese, que altera o estado da chave semicondutora do conversor comparando valor de referência com o valor medido considerando erro devido à histerese. Esse último considera a não-linearidade, podendo gerar conteúdo harmônico devido à necessidade de alta taxa de amostragem (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012).

De forma geral, todas as estratégias de controle necessitam de ter estabilidade, desempenho dinâmico, especificações sujeitas à regulamentação, impor condições de operação e limites que não são satisfeitos só com hardware. Mudanças de tendência do setor industrial demandam métodos de controle mais avançados para atingir os requerimentos como: variável controlada com menor erro possível, dinâmica rápida, seguir referência e rejeitar distúrbios

(perturbações), minimizar perdas por chaveamento para aumentar a eficiência dos semicondutores, atender a limites de conteúdo harmônico (THD) inerentes dos sistemas chaveados dos conversores, proporcionar compatibilidade eletromagnética (EMC) de acordo com padrões e regulamentação, possibilitar minimização da tensão de modo comum e, por fim, manter um bom desempenho para uma grande variedade de condições operacionais. Além das especificações, o controle ainda deve lidar com as restrições inerentes do tipo de conversor usado como chaveamento proibido, equilíbrio de tensão, desequilíbrio de potência, migração de ressonância entre outros (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012).

Com o avanço da tecnologia, a criação de microprocessadores com maior poder de processamento permite a realização de um controle digital sofisticado que cada vez mais é demandado pelas variadas aplicações. Com isso surgiram a o controle por lógica fuzzy, redes neurais, controle por modos deslizantes e o controle preditivo. Com isso surgiram soluções para as demandas de controle, como o de conversores multiníveis (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012).

O controle preditivo pode ter várias abordagens diferentes, consistindo em usar um modelo do sistema para calcular previsões do comportamento futuro das variáveis controladas e a partir disso usar algum método de otimização para escolher a melhor ação a seguir. Essa característica do controle preditivo o torna uma boa opção para aplicações de cargas mais sensíveis, onde as variações devem ser muito bem controladas. Isso não é possível com o controle convencional pois ele espera que a variável controlada saia do valor desejado para então realizar uma ação corretiva, promovendo uma variação que pode ser brusca e prejudicar sistemas mais sensíveis.

O controle preditivo pode ser considerado adequado para os conversores de potência porque ele possibilita entregar a eficiência que está sendo demandada pelo mercado levando em consideração a não-linearidade do sistema, conseguindo ainda restringir a tensão de saída máxima do inversor e limitando a corrente de segurança do equipamento e da carga. A não-linearidade, o número finito de estados de chaveamento e o atendimento das restrições são características dos conversores de potência e acionamentos. O controle atual implementa tempo discreto usando modelos conhecidos de conversores de potência e acionamentos

através de uma plataforma de controle rápida, que pode ser desenvolvida em hardware, como por exemplo um FPGA ou DSP.

Sendo assim, o presente projeto de graduação dará foco em estudar controle preditivo para conversores de potência em acionamento de uma carga através do uso do *software Simulink/MatLab* para testes. A mesma envolve mais especificamente o controle preditivo da tensão do elo CC de um retificador trifásico convencional. Com intuito de futuramente avançar nos estudos que se referem ao controle preditivo de conversores multiníveis. Para tal, serão estudadas técnicas de controle preditivo propostas por QUEVEDO, DANIEL E. Et al;2010 e por PÉREZ, MARCELO A.;2011.

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral do projeto de graduação e relevância do tema. No capítulo 2 serão apresentadas as aplicações de conversores de potência e o controle convencional que é utilizado na indústria. Além disso, apresentará também os conceitos básicos do controle preditivo baseado em modelo. No capítulo 3 será visto o modelo do retificador utilizado e a modelagem matemática de ambos os esquemas de controle preditivo baseado em modelo propostos como objetos de estudo neste projeto de graduação. Os resultados das simulações serão apresentados no capítulo 4, juntamente com uma comparação entre os métodos estudados. No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões deste trabalho, assim como sugestões de estudos futuros.

2 CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO APLICADO EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

O tema deste projeto de graduação foi altamente estudado nas últimas décadas. Nesta seção, será apresentada a evolução do tema ao longo dos tempos, que servirá como embasamento teórico para o desenvolvimento do projeto de graduação.

2.1 Aplicações de Conversores de Potência

O controle do fluxo de energia elétrica entre sistemas distintos é necessário em muitas aplicações e esse controle é feito usualmente por chaves semicondutoras. Foram desenvolvidos os semicondutores a estado sólido para atender as demandas de aumento de eficiência, rapidez e diminuição de tamanho e volume dos equipamentos. O desenvolvimento do tiristor (*silicon controlled rectifier*) nos anos 60 pelos laboratórios da General Electric, criou a Eletrônica de Potência, dedicada ao estudo de conversores estáticos de energia elétrica (BARBI, IVO; 2006).

Além dos semicondutores (podem ser diodos, tiristores, transistores, GTO's, Triac's, IGBT's e MOSFET's), que são elementos ativos, os conversores também podem ser formados por elementos passivos, como resistores, capacitores e indutores (BARBI, IVO; 2006).

Conversores de potência são aplicados em diversos setores como industrial, residencial e no ramo de energia renovável. Dentro de cada um desses setores temos várias aplicações como acionamento de máquina, conversão de energia, condicionador de ar e painéis fotovoltaicos. Com um uso alto, a demanda por aumentar a eficiência de tais circuitos aumentou muito ao longo dos anos e ele foi amplamente estudado nas últimas décadas (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012).

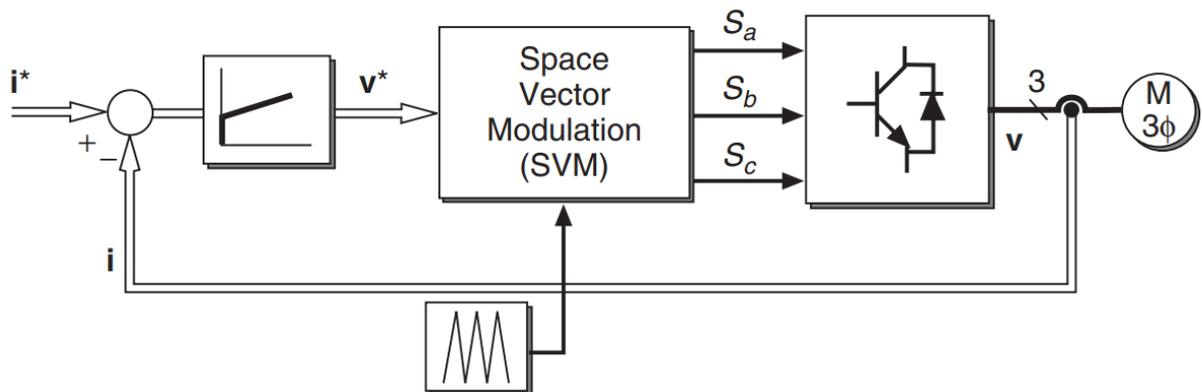
2.2 Controle Convencional

Com o surgimento dos tiristores, a necessidade de pulso de disparo fez surgir os primeiros circuitos analógicos para controlar o acionamento dos conversores. Ao longo dos anos, muitos tipos de controle foram criados e aplicados e alguns serão apresentados a seguir

(RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012). Dentre os métodos de controle de conversores, alguns foram consolidados ao longo dos anos, como o controle linear e o controle por histerese.

O controle linear usa de um modelo linearizado, o que diminui os pontos de operação em que o controle pode ser usado, não levando em conta a não-linearidade dos sistemas. Um esquema de controle clássico utilizando *Space Vector Modulation* pode ser observado na Figura 1.

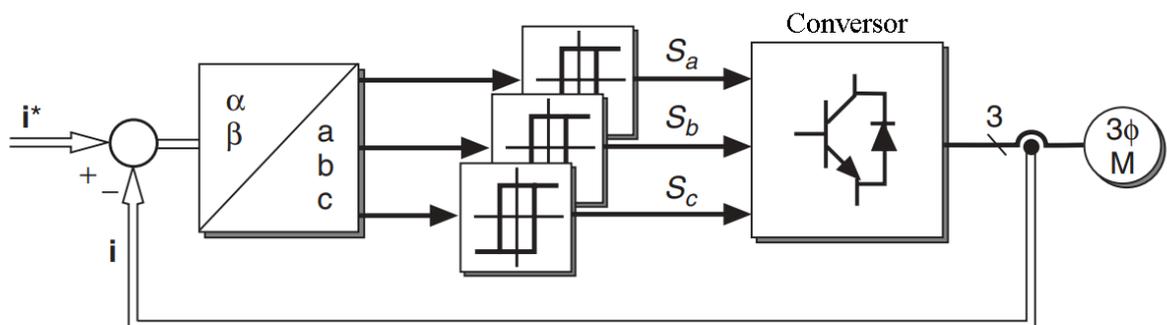
Figura 1 - Esquema de Controle Clássico usando *Space Vector Modulation*.



Fonte: Rodriguez, Jose e Cortes, Patricio (2012).

Já o controle por histerese é simples e consiste em fazer um chaveamento quando a corrente atinge os limites da banda de histerese, leva em consideração a não-linearidade do sistema, diferentemente do controle linear. Na Figura 2 há uma representação da malha deste controle. O controle por histerese pode não ser uma boa ideia em circuitos com alta taxa de chaveamento porque pode gerar ressonância. Cada um tem suas vantagens dependendo da aplicação (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012).

Figura 2 - Esquema de Controle de Corrente por Histerese Trifásico



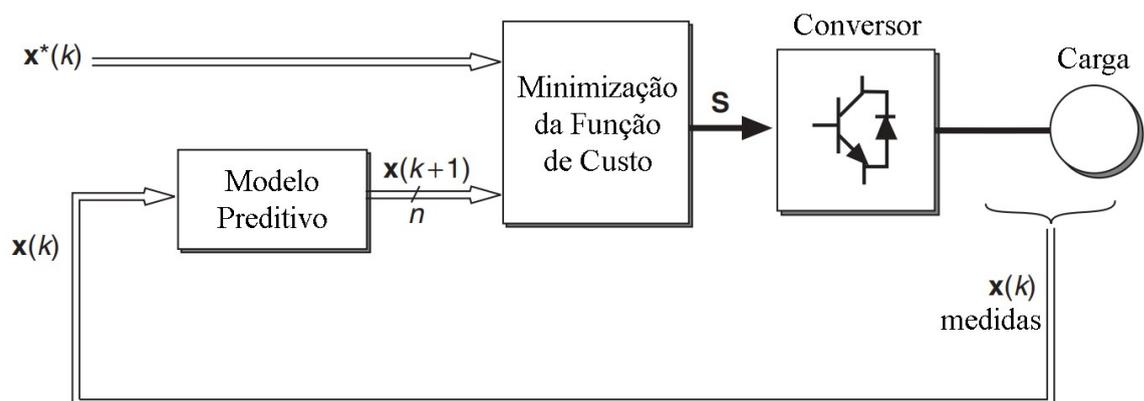
Fonte: Adaptado de Rodriguez, Jose e Cortes, Patricio (2012).

2.3 Controle Preditivo Baseado em Modelo

Com o avanço da tecnologia e desenvolvimento de microprocessadores poderosos, novos métodos de controle foram surgindo. Métodos como controle por lógica Fuzzy, Redes Neurais e o controle preditivo abriram novas possibilidades para o controle de conversores estáticos. O controle preditivo é considerado particularmente adequado (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012) para o controle dos conversores. Dentre as vantagens estão: fácil de incluir restrições não-lineares do sistema, intuitivo e fácil de compreender, pode ser aplicado em vários sistemas diferentes, considera-se o uso de conversores multiníveis e fácil de implementar.

O controle preditivo baseado em modelo é classificado na literatura de duas formas distintas de operação, o modo contínuo e o modo finito. O modo finito será utilizado neste trabalho por sua baixa complexidade e proporcionar otimização online (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012). Ele consiste em usar um modelo do sistema para previsão do comportamento futuro das variáveis a serem controladas. Usando informações do sistema e critérios de otimização obtém-se uma atuação ótima do sistema, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Representação gráfica das etapas envolvidas no controle preditivo baseado em modelo.



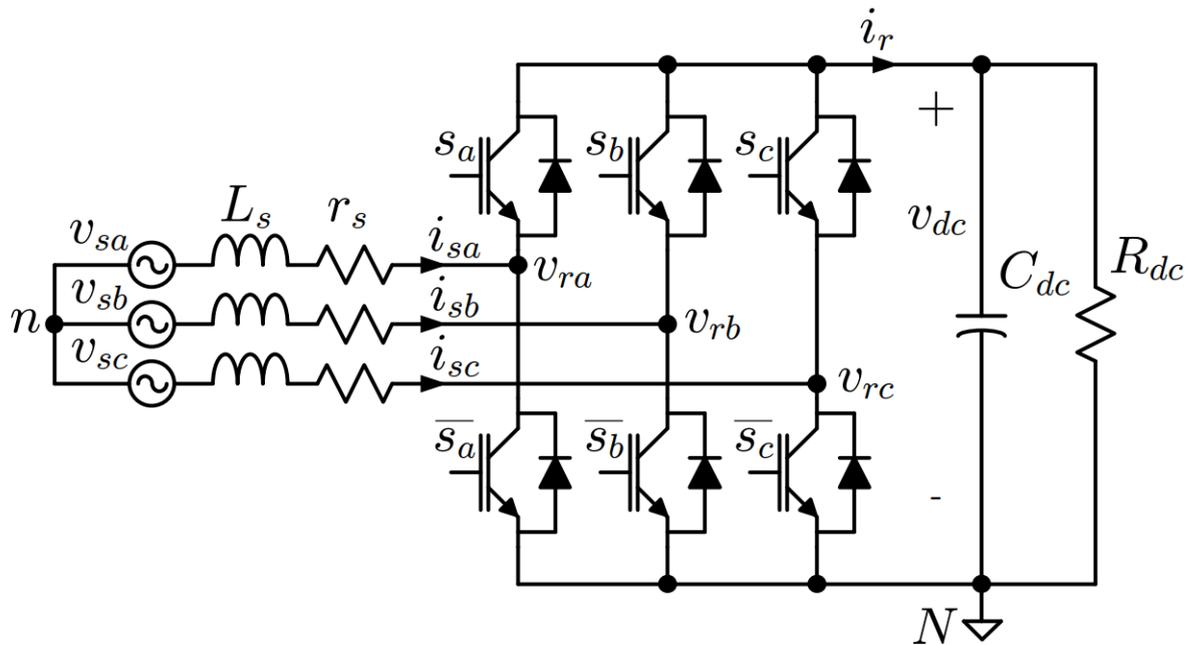
Fonte: Adaptado de Rodriguez, Jose e Cortes, Patricio (2012).

Sendo de interesse controlar a variável $x(k)$ na saída do conversor, é dado um valor de referência $x^*(k)$. Calculando o valor futuro dessa variável com base no modelo matemático do conversor $x(k+1)$. Dado a função de custo,

$$custo = |x^*(k) - x(k + 1)| \quad (1)$$

A variável $x(k + 1)$, previsão da saída do conversor, depende do chaveamento do mesmo. Considerando o retificador trifásico front-end ativo, como mostra a Figura 4, temos 6 chaves: s_a , \bar{s}_a , s_b , \bar{s}_b , s_c e \bar{s}_c . O conversor tem a restrição de chaveamento que impede chaves do mesmo braço do conversor estarem ativas simultaneamente, sendo assim apenas uma das chaves correspondente a respectiva fase estará fechada. Isso confere dois estados para cada braço do conversor, 0 ou 1. Por exemplo, para o braço da fase a o estado 1 indica que s_a está ativa e \bar{s}_a está inativa. Já o estado 0 quer dizer que \bar{s}_a está ativa e s_a está inativa, impedindo que sejam fechadas ao mesmo tempo. Deixando, assim, 8 possibilidades para o vetor s conforme listadas na equação (2).

Figura 4 - Retificador Front-End ativo.



Fonte: Rodriguez, Jose e Cortes, Patricio (2012)

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

O algoritmo calcula todos os valores possíveis de $x(k + 1)$ para cada um dos chaveamentos possíveis e compara todos esses valores com o valor de referência. E usando a função custo, escolhe a combinação de S que a minimiza.

3 MODELAGEM DO ESQUEMA DE CONTROLE PROPOSTO

Este capítulo tem o objetivo de apresentar o modelo do retificador (RODRIGUEZ, JOSE; CORTES, PATRICIO; 2012), que será utilizado para o controle preditivo baseado em modelo. Além disso, apresentar detalhadamente os métodos de controle estudados e que serão testados nas simulações na próxima seção.

3.1 Modelagem do Retificador

Considerando o retificador da Figura 4, pode ser modelado como a seguir. Pela Lei de Kirchhoff, temos que do lado da entrada,

$$v_{sa} = L_s \frac{di_{sa}}{dt} + r_{sa} i_{sa} + s_a v_{dc} + v_{Nn} \quad (3)$$

$$v_{sb} = L_s \frac{di_{sb}}{dt} + r_{sb} i_{sb} + s_b v_{dc} + v_{Nn} \quad (4)$$

$$v_{sc} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + r_{sc} i_{sc} + s_c v_{dc} + v_{Nn} \quad (5)$$

$$v_{Nn} = - \frac{s_a + s_b + s_c}{3} v_{dc}$$

e no elo CC temos que,

$$i_r = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R_{dc}} \quad (6)$$

Sendo

$$i_s = [i_{sa} \quad i_{sb} \quad i_{sc}]^T$$

$$v_s = [v_{sa} \quad v_{sb} \quad v_{sc}]^T$$

$$s = [s_a \quad s_b \quad s_c]^T$$

O sistema pode ser representado por

$$v_s = L_s \frac{di_s}{dt} + r_s i_s + Ms v_{dc} \quad (7)$$

onde M é

$$M = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Discretizando o sistema de primeira ordem com o Euler *forward method*, tem-se que

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (8)$$

onde T_s é o período de amostragem. Então pode-se obter uma aproximação da corrente futura como

$$i_s(k+1) = \left(1 - \frac{r_s T_s}{L_s}\right) i_s(k) + \frac{T_s}{L_s} (v_s(k) - Ms(k) v_{dc}(k)) \quad (9)$$

Considerando um período de amostragem pequeno suficiente devido à frequência fundamental da rede pode-se assumir que

$$v_s(k+1) \approx v_s(k) \quad (10)$$

Portanto, a potência instantânea de entrada do retificador no tempo $k+1$ pode ser calculada como

$$P_s(k+1) = \text{Re}\{v_s(k) i_s^*(k+1)\} \quad (11)$$

$$Q_s(k+1) = \text{Im}\{v_s(k) i_s^*(k+1)\} \quad (12)$$

onde $i_s^*(k+1)$ é o conjugado da corrente prevista calculada.

Na Figura 5 pode ser observada a implementação desse modelo preditivo como uma função de um bloco do *software simulink*. O vetor S da linha 3 representa as possibilidades de chaveamento representadas pela equação (2). Com o vetor a na linha 4 insere a defasagem de ângulo entre as três fases. O cálculo da corrente $i_s(k + 1)$ do instante futuro da equação (9) é calculado na linha 6. Com o valor da corrente futura, é possível calcular as potências futuras do lado CA das equações (11) e (12) mostradas nas linhas 8 e 9.

Figura 5 - Função do modelo preditivo implementada no *software simulink*.

```

1  function [Qsk1,Psk1] = mpc(rs,Ls,Ts,vdc,vsk,isk)
2
3  S = [0 0 0; 0 0 1; 0 1 0; 0 1 1; 1 0 0; 1 0 1; 1 1 0; 1 1 1];
4  a = [1; exp(1i*2*pi/3); exp(1i*2*pi/3)^2];
5
6  isk1 = (1-(rs*Ts)/Ls)*isk + (Ts/Ls)*(vsk - (2/3)*S*a*vdc);
7
8  Psk1 = (3/2)*real(vsk*conj(isk1));
9  Qsk1 = (3/2)*imag(vsk*conj(isk1));

```

Fonte: Produção da própria autora

3.2 Controle Preditivo Baseado em Modelo para o controle do elo CC do retificador

O controle de retificadores *front-end* ativos é feito, em geral, com o uso de um controlador proporcional integral, como dito anteriormente. Há estudos onde são propostas formas de controle preditivo (QUEVEDO, DANIEL E. Et al;2010) e alguns se combinam com uma forma de controle linear (PÉREZ, MARCELO A.;2011). Ambos os controles propostos nos artigos mencionados serão estudados a seguir.

3.2.1 Controle Preditivo Puro

O primeiro método estudado será o do artigo que contém o método de controle preditivo puro (QUEVEDO, DANIEL E. Et al;2010). Esse método é o que contém uma forma mais pura de controle preditivo entre ambos, isto é, não é combinado com o controle linear tradicional. Para fazer uma alteração na tensão do elo CC, a corrente que chega no capacitor i_c deve sofrer alteração. Da equação (6), discretizando, temos

$$i_c = C \frac{dv_{dc}}{dt} \approx \frac{C_{dc}}{T_s} (v_{dc}(k+1) - v_{dc}(k)) \quad (13)$$

O valor de referência não pode ser arbitrário, portanto foi proposta uma referência de tensão dinâmica $\bar{v}_{dc}^*(k+1)$ tal que

$$\bar{v}_{dc}^*(k+1) = v_{dc}(k) + \frac{1}{N^*} (v_{dc}^*(k) - v_{dc}(k)) \quad (14)$$

Medindo a diferença entre o valor desejado de referência no elo CC e somando uma fração desse valor ao valor que está sendo medido e, assim, ao recalculer o erro ele estará cada vez menor até que o valor medido chegue ao alvo. Essa fração é definida por N^* , que determina o número de passos que serão dados para atingir a referência, e é único parâmetro de projeto da nova referência. A partir da equação (14), pode-se obter os valores de corrente $i_c^*(k+1)$ futura

$$i_c^*(k+1) = \frac{C_{dc}}{T_s} (\bar{v}_{dc}^*(k+1) - v_{dc}(k)) \quad (15)$$

$$i_r^*(k+1) = i_c^*(k+1) + \frac{1}{2R_{dc}} (v_{dc}(k) + \bar{v}_{dc}^*(k+1)) \quad (16)$$

Agora com essa corrente futura capacitor da equação (16), pode-se calcular a referência de potência que deverá ser provida pela fonte de corrente alternada de entrada para atingir a referência.

$$P_r^*(k+1) = \bar{v}_{dc}^*(k+1) i_r^*(k+1) \quad (17)$$

$$= \left(\frac{1}{2R_{dc}} + \frac{C_{dc}}{T_s} \right) \bar{v}_{dc}^*(k+1) v_{dc}(k+1) + \left(\frac{1}{2R_{dc}} - \frac{C_{dc}}{T_s} \right) \bar{v}_{dc}^*(k+1) v_{dc}(k+1) \quad (18)$$

Considerando apenas componentes fundamentais das correntes da fonte. Além da potência de saída, ainda há perdas no conversor causadas por r_s que devem ser fornecidas pela fonte também. Então a potência total a ser fornecida pela fonte $P_s^*(k+1)$ pode ser escrita como

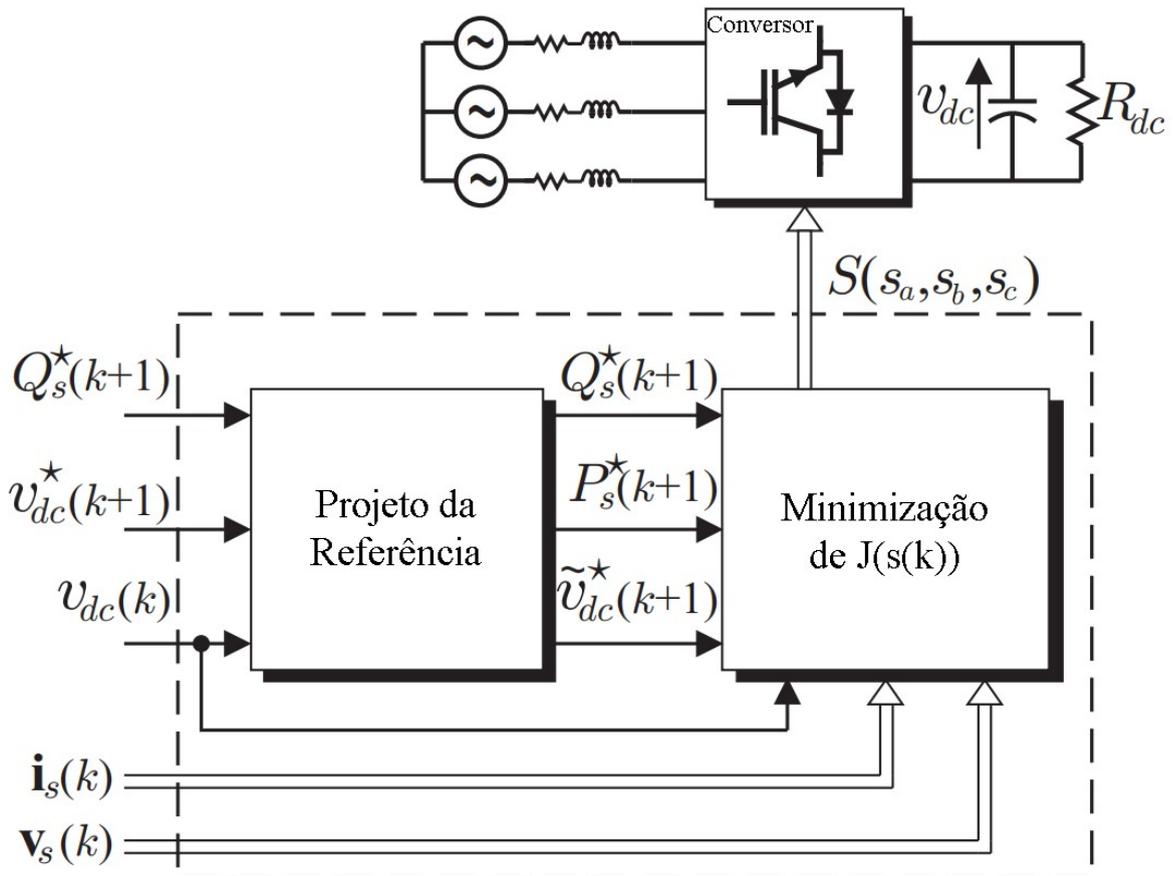
$$P_s^*(k+1) = \frac{2r_s}{3V_s^2} (P_s^*(k+1))^2 + P_r^*(k+1) \quad (19)$$

Portanto,

$$P_s^*(k+1) = \frac{3V_s^2}{2r_s} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{8r_s}{3V_s^2} P_r^*(k+1)} \right) \quad (20)$$

Assim, temos referências de tensão e potência que são calculadas em cada instante k , fazendo um rastreamento dinâmico. Juntamente com a referência de potência reativa, pode-se calcular com a função de custo o estado de s_a , s_b e s_c que melhor atendem as referências, como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Esquema de funcionamento do controle preditivo baseado em modelo proposto.



Fonte: Adaptado de Quevedo, Daniel E. Et al (2010).

Na Figura 7 pode-se observar uma implementação da função custo em um bloco do *software Simulink*. Nele há uma comparação entre o valor previsto das equações (11) e (12) e o valor

calculado da referência, minimizando para escolher entre cada uma das possibilidades de chaveamento apresentadas na equação (2).

Figura 7 - Função custo implementada no *software simulink*.

```

1  function S_option = custo(Qsk1,Psk1,Ps_ref,Qs_ref)
2
3  custo = abs(Ps_ref*ones(8,1) - Psk1) + abs(Qs_ref*ones(8,1) - Qsk1);
4  [~,I] = min(custo);
5  switch I
6      case 2
7          S = [0 0 1];
8      case 3
9          S = [0 1 0];
10     case 4
11         S = [0 1 1];
12     case 5
13         S = [1 0 0];
14     case 6
15         S = [1 0 1];
16     case 7
17         S = [1 1 0];
18     case 8
19         S = [1 1 1];
20     otherwise
21         S = [0 0 0];
22 end
23 S_option = transpose(S);

```

Fonte: Produção da própria autora.

3.2.2 Controle Preditivo com Integrador

No artigo que usa o método com integrador é apresentada uma outra forma de calcular uma potência ativa de referência usando um integrador. Apresentando uma forma de controle preditivo combinado com controle linear. Primeiramente, é calculada uma potência P_r com o valor da referência de tensão dado,

$$P_r = \frac{(v_{dc}^*)^2}{R_{dc}} \quad (21)$$

Dada a equação de potência do retificador,

$$p_s = \frac{2r_s}{3V_s^2} (p_s^2 + q_s^2) + \frac{v_{dc}^2}{R_{dc}} \quad (22)$$

Podemos calcular a potência aproximada P_s^{\sim} que deve entrar no retificador para que a saída seja a potência desejada, segundo referência de tensão dada e uma referência de potência reativa,

$$P_s^{\sim} = \frac{3V_s}{4r_s} \left(V_s - \sqrt{V_s^2 - \frac{8r_s(v_{dc}^*)^2}{3R_{dc}} - \frac{16r_s^2(Q_s^*)^2}{9V_s^2}} \right) \quad (23)$$

O balanço de potência no elo CC é dado por,

$$\tilde{i}_{dc} v_{dc}^* = P_s^{\sim} - \frac{2r_s}{3} \left(\frac{P_s^{\sim}}{V_s} \right)^2 - \frac{2r_s}{3} \left(\frac{Q_s^*}{V_s} \right)^2 \quad (24)$$

Então, a corrente no elo CC aproximada \tilde{i}_{dc} pode ser descrita como,

$$\tilde{i}_{dc} = \frac{3}{2v_{dc}^*} \left(\frac{2}{3} P_s^{\sim} - \frac{4r_s}{9} \left(\frac{P_s^{\sim}}{V_s} \right)^2 - \frac{4r_s}{9} \left(\frac{Q_s^*}{V_s} \right)^2 \right) \quad (25)$$

Usando a corrente do elo CC medida e a corrente que foi aproximada, o artigo propõe o uso de um integrador,

$$\Delta v_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int_t^{t+\Delta t} (\tilde{i}_{dc} - i_{dc}) d\tau \quad (26)$$

Há várias maneiras de implementar essa integração no *simulink*, na Figura 8 é mostrado uma forma usando um integrador externo ao bloco de códigos. Na linha 4 se encontra a equação (21), a linha 6 equação (23) e a linha 8 equação (25). Ao fim da função deste bloco, é dado o valor que será passado por um integrador externo cujo resultado será usado na equação (26).

Figura 8 - Primeiro passo para cálculo da referência de potência ativa implementado no *software simulink*.

```

1  function [func_atual,Pr] = calcula_Pref(Rdc,rs,vsk,fdc,vdc_ref,Qs_refin)
2
3  Vs=norm(vsk);
4  Pr=(vdc_ref^2)/Rdc;
5
6  Ps_t=((3*Vs)/(4*rs))*(Vs-sqrt((Vs^2-((8*rs*vdc_ref^2)/(3*Rdc))- ...
7      ((16*rs^2*Qs_refin^2)/(9*Vs^2)))));
8  fdc_t=(3/(2*vdc_ref))*(((2/3)*Ps_t)-((4*rs/9)*(Ps_t/Vs)^2)-((4*rs/9)* ...
9      (Qs_refin/Vs)^2));
10 func_atual=fdc_t-fdc;

```

Fonte: Produção da própria autora.

E com isso, calcular a referência de potência P_s^* que vai entrar no cálculo da função de custo do controle preditivo,

$$\Delta P_r = i_{dc} \Delta v_{dc} \quad (27)$$

$$P_r^* = P_r + \Delta P_r \quad (28)$$

$$P_s^* = \frac{3V_s}{4r_s} \left(V_s - \sqrt{V_s^2 - \frac{8r_s P_r^*}{3} - \frac{16r_s^2 (Q_s^*)^2}{9V_s^2}} \right) \quad (29)$$

Para implementação das equações (26) a (29), o valor integrado citado anteriormente pode ser calculado como mostra a Figura 9. Agora com o valor da potência ativa de referência, pode-se escolher o melhor chaveamento do conversor, segundo a função de custo, modelada como na equação (30).

Figura 9 - Cálculo da referência de potência ativa implementado no *software simulink*.

```

1  function Ps_ref = calcula_Pref2(integral_func,Cdc,rs,Pr,vsk,fdc,Qs_refin)
2
3  Vs=norm(vsk);
4  delta_vdc=(1/Cdc)*integral_func;
5  delta_Pr=fdc*delta_vdc;
6  Pr_ref=Pr+delta_Pr;
7
8  Ps_ref=((3*Vs)/(4*rs))*(Vs-sqrt((Vs^2-((8*rs*Pr_ref)/3)- ...
9      ((16*rs^2*Qs_refin^2)/(9*Vs^2)))));

```

Fonte: Produção da própria autora.

4 RESULTADOS

Para analisar os resultados obtidos com os controles propostos no retificador trifásico modelado na seção 3.1 , foram feitas simulações de controle de tensão no elo CC com uso do *software Simulink*. Como este trabalho tem o foco em replicar os resultados propostos nos artigos mencionados anteriormente, o projeto do retificador não foi desenvolvido e nem analisado. Usando os valores do artigo (PÉREZ, MARCELO A.;2011), retificador do modelo da Figura 4 foi montado com valores representados na Tabela 1.

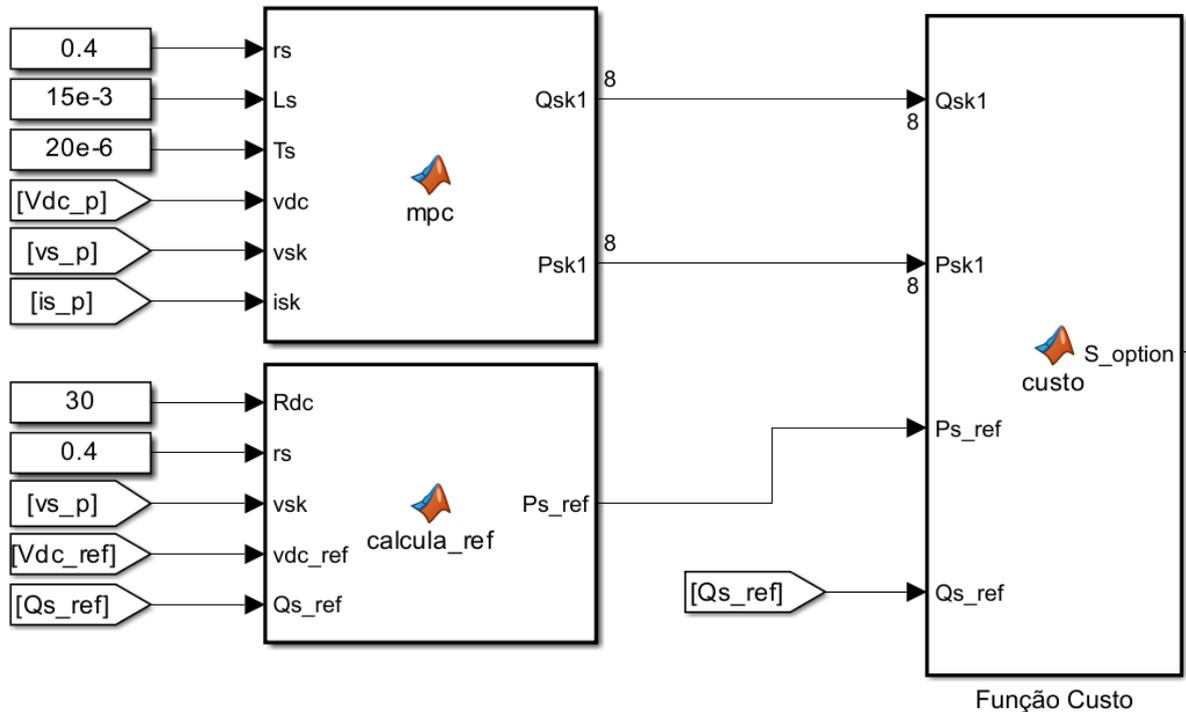
Tabela 1 - Valores do retificador usados na Simulação.

Grandezas	Valores
$C_{dc} (\mu F)$	1500
$R_{dc} (\Omega)$	30
$r_s (\Omega)$	0,4
$L_s (mH)$	15
$V_{s\ pico} (V)$	$22\sqrt{2}$
$T_s (\mu s)$	20

Fonte: Produção própria da autora.

O modelo proposto na seção 3.2.1 (QUEVEDO, DANIEL E. Et al;2010) foi simulado, como mostra a Figura 11, e obteve um desempenho que variou com os valores das referências de tensão e potência reativa dadas. Algumas faixas de valores das referências de entrada no sistema de controle podem causar erros referente à raiz equação (20), devido aos valores negativos resultantes.

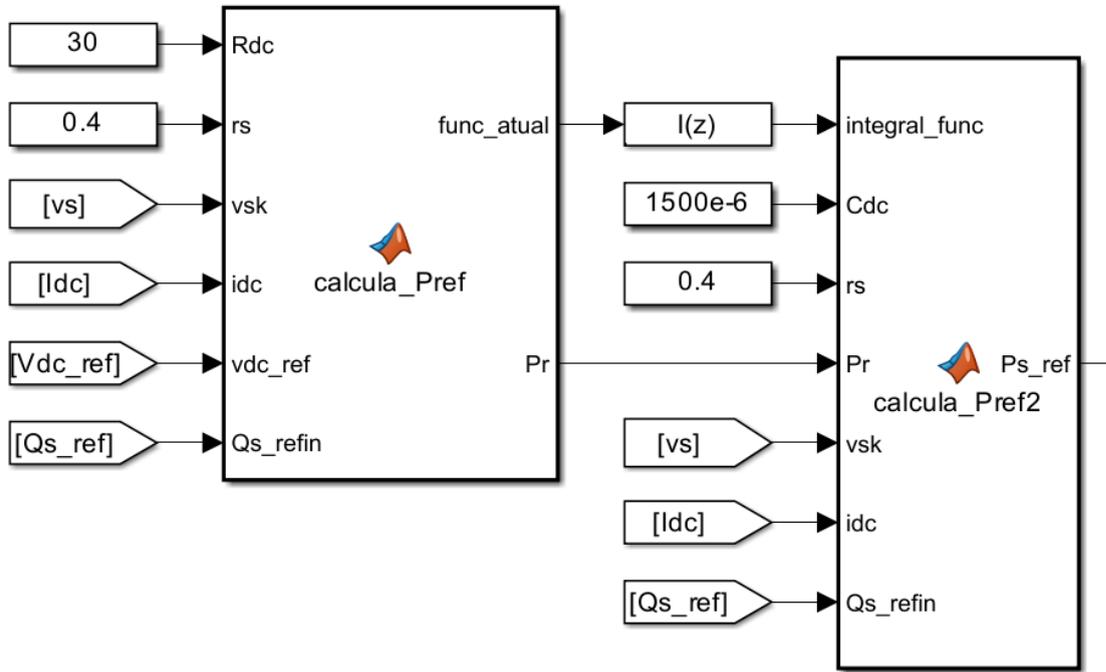
Figura 11 - Simulação do método de controle preditivo baseado em modelo puro.



Fonte: Produção própria da autora

O modelo proposto na seção 3.2.2 (PÉREZ, MARCELO A.;2011) foi simulado também e obteve um desempenho que variou com os valores das referências de tensão e potência reativa dadas. Algumas faixas de valores das referências de entrada no sistema de controle podem causar erros referentes às raízes das equações (23) e (29). A simulação difere do método anterior apenas no cálculo da potência ativa de referência, como mostra a Figura 12, com um bloco integrador.

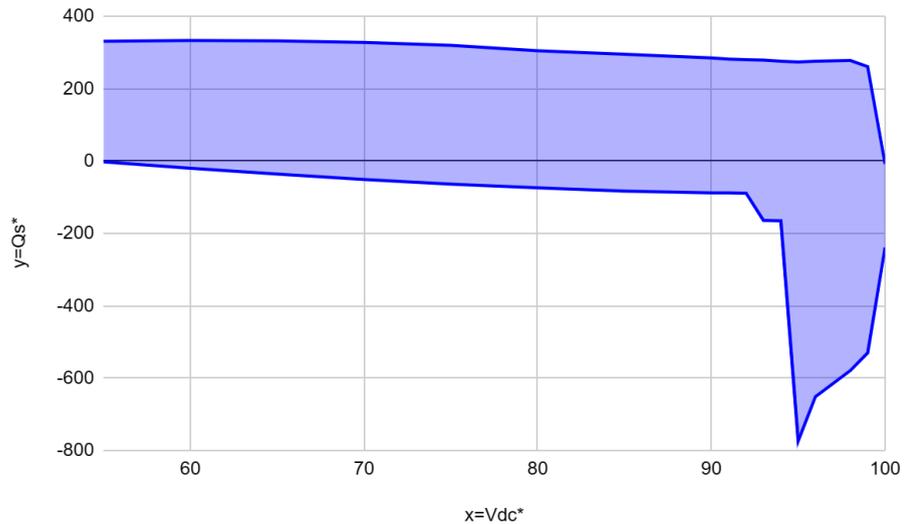
Figura 12 - Simulação do método de controle preditivo baseado em modelo com integrador.



Fonte: Produção própria da autora

Ambas as simulações obtiveram bom desempenho no controle da tensão desejada no elo CC para alguns pontos de operação, representados pela área do gráfico da Figura 13. Os pontos de operação fora dessa área obtiveram erros na simulação. As referências dadas na Figura 14 são 3 pontos de operação que pertencem a esta área.

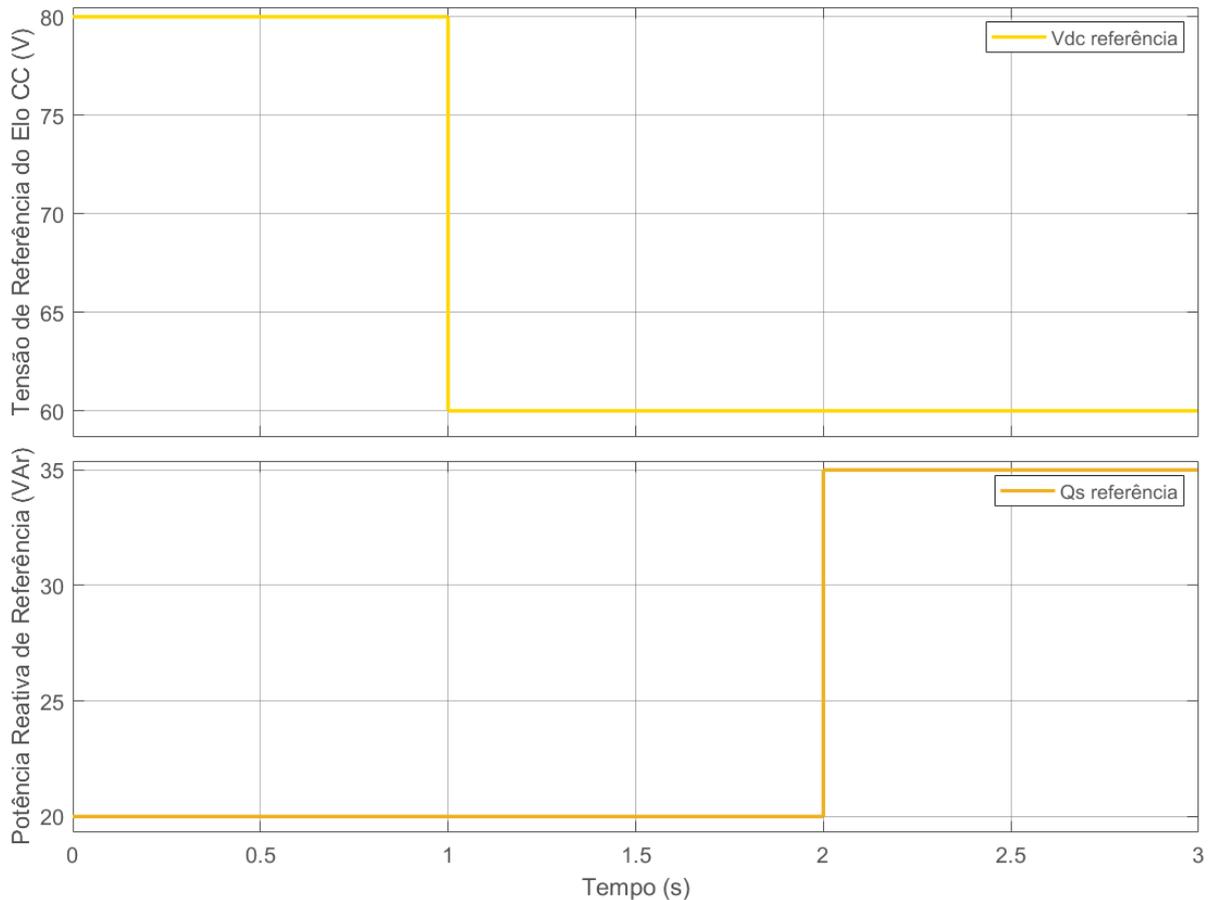
Figura 13 - Área em que o controle teve bom desempenho



Fonte: Produção própria da autora

Essa referência de tensão será representada como um degrau para que possa ser avaliada a transição de um valor de referência para outro. O mesmo será feito com a referência de potência reativa. Os degraus na referência da tensão do elo CC e na referência da potência reativa do retificador, conforme apresentado na Figura 14, são utilizados para a obtenção dos resultados de ambas as simulações.

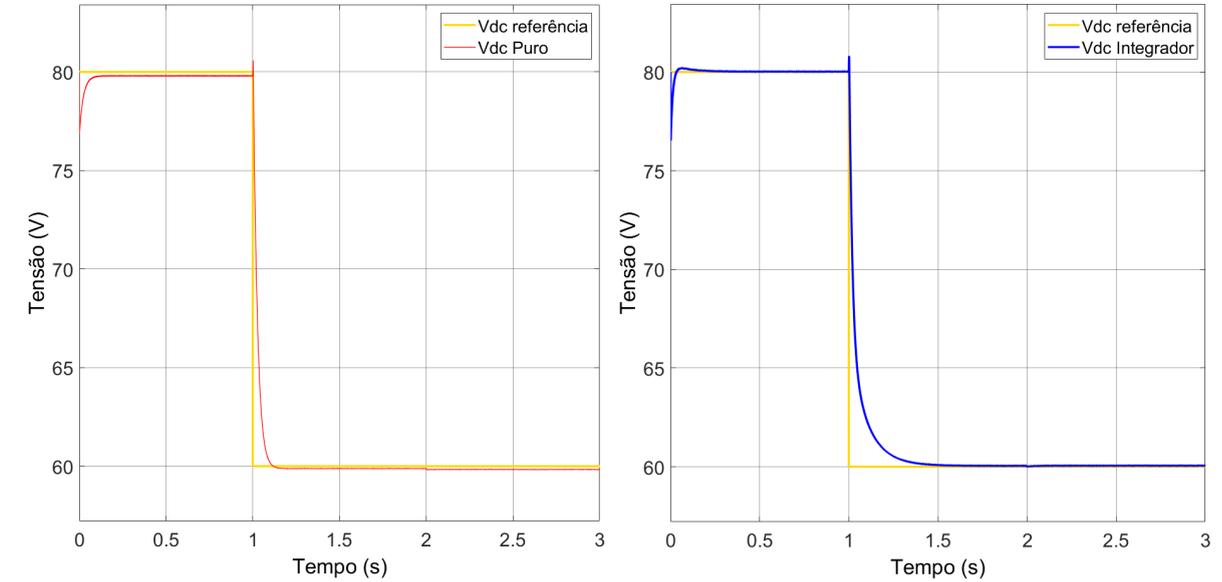
Figura 14 - Referência de tensão para o elo CC e referência de potência reativa.



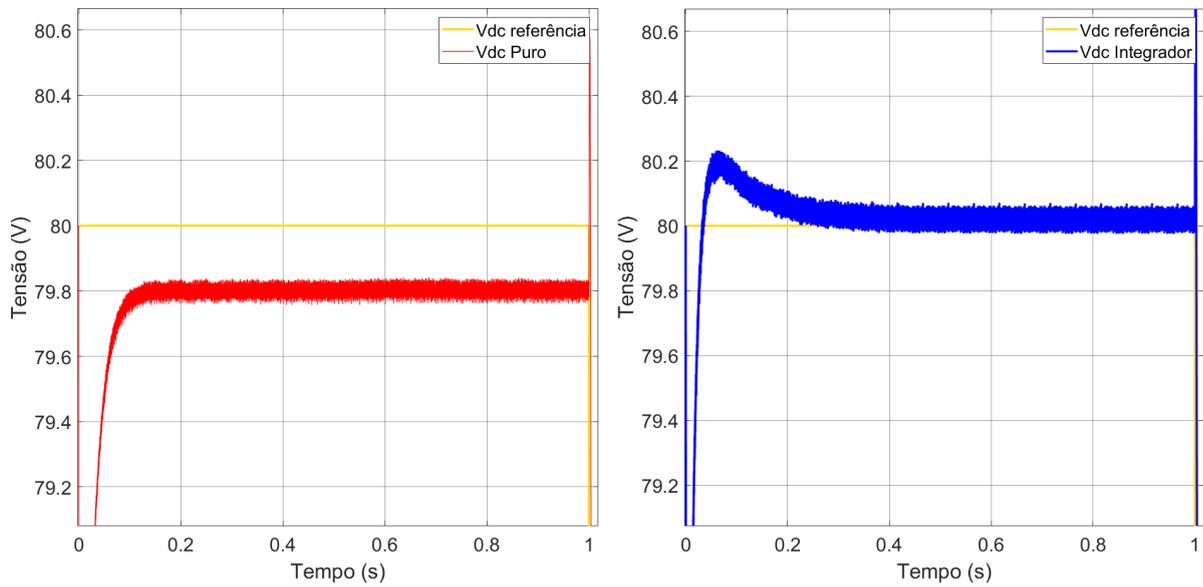
Fonte: Produção própria da autora

Os resultados de tensão no elo CC podem ser observados na Figura 15, para ambas as simulações. Para esses pontos de operação, a tensão medida seguiu a referência de tensão dada. Através dos detalhamentos desta resposta é possível observar algumas diferenças entre os métodos.

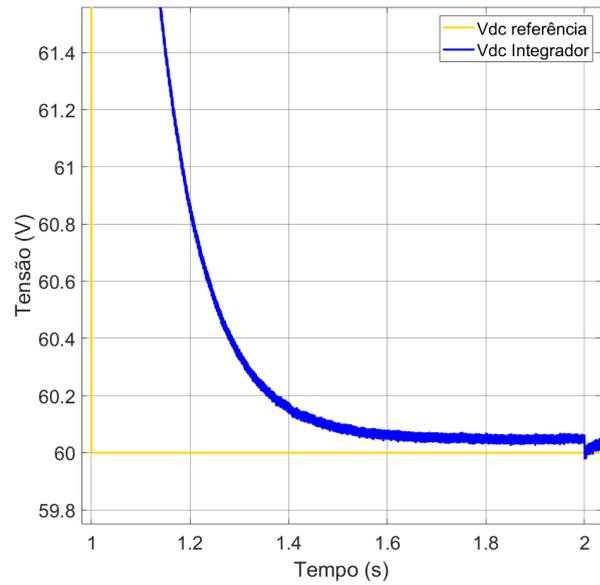
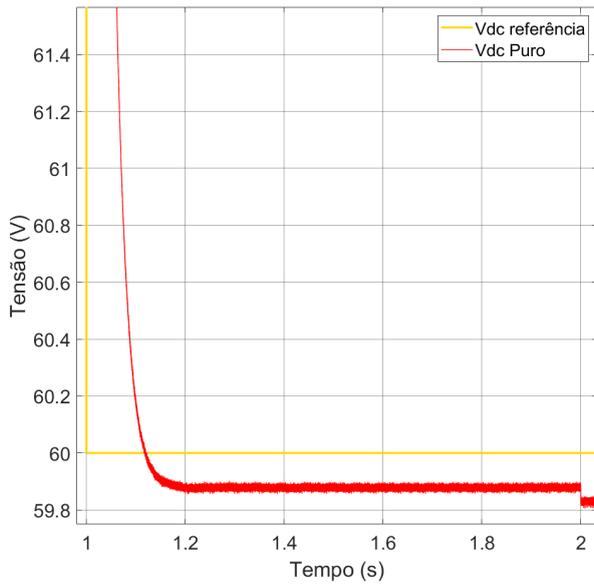
Figura 15 - Resultados da tensão no elo CC. a) Comparação da referência de tensão e o valor medido no elo CC em ambas as simulações. b) Comparação da referência de tensão e o valor medido no elo CC: detalhamento de 0 a 1 segundo. c) Comparação da referência de tensão e o valor medido no elo CC: detalhamento de 1 a 2 segundos. d) Comparação da referência de tensão e o valor medido no elo CC: detalhamento de 2 a 3 segundos.



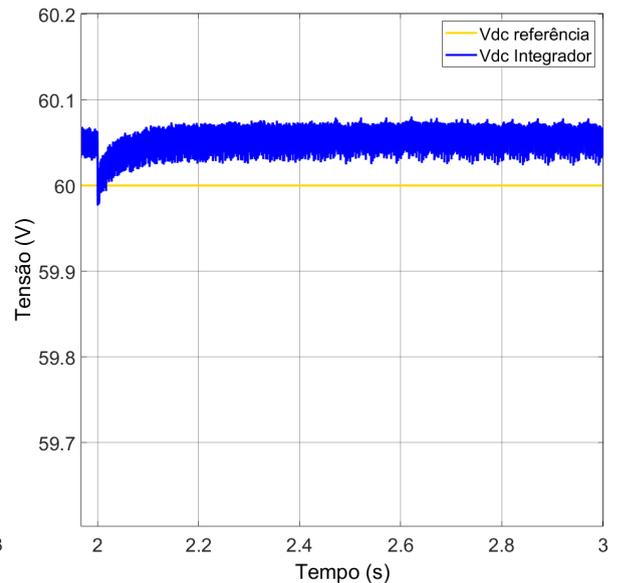
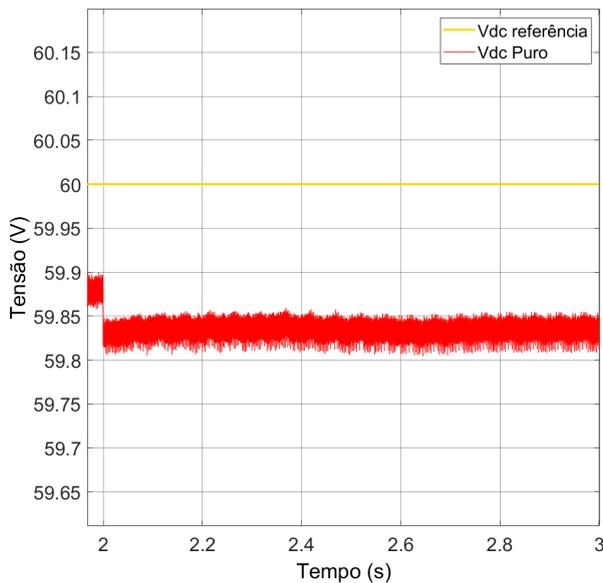
a)



b)



c)



d)

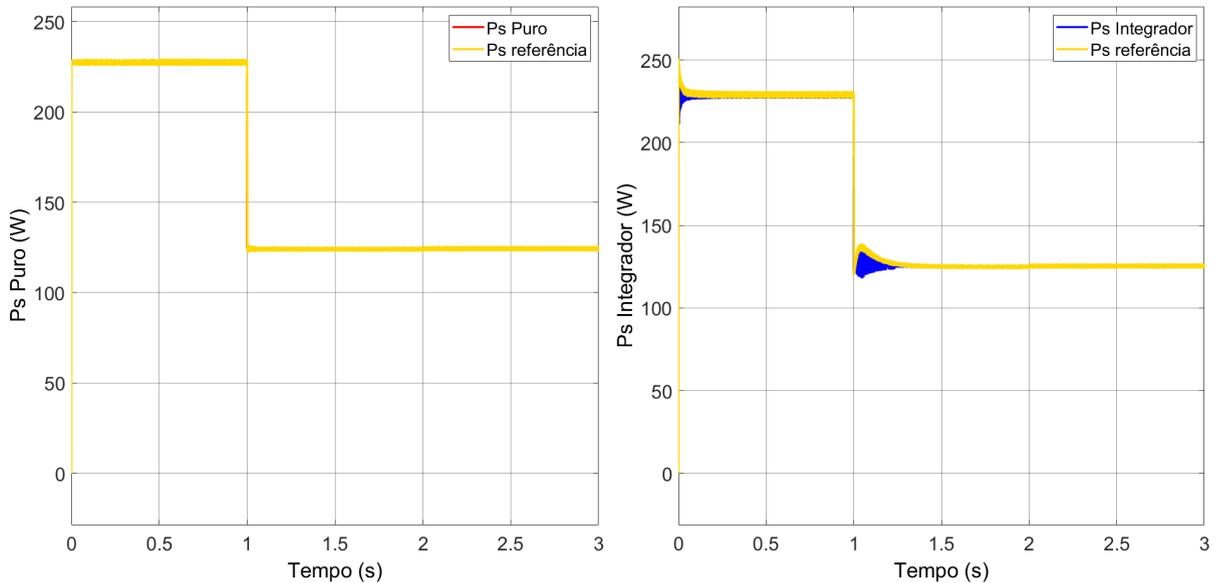
Fonte: Produção própria da autora

No primeiro ponto de operação, entre 0 e 1 segundo, o método puro apresenta uma resposta rápida e sem sobressinal porém deixando um erro em regime de 0.2 V, enquanto o integrador remove o erro em regime no segundo método, como pode ser visto na Figura 15b. No segundo ponto de operação, entre 1 e 2 segundos, o método puro continua com menor tempo de resposta e erro em regime, enquanto o método com integrador agora tem erro em regime também, visto na Figura 15c. No tempo de 2 segundos, há uma queda de tensão devido ao aumento da referência de potência reativa no método puro. Além disso, o método com

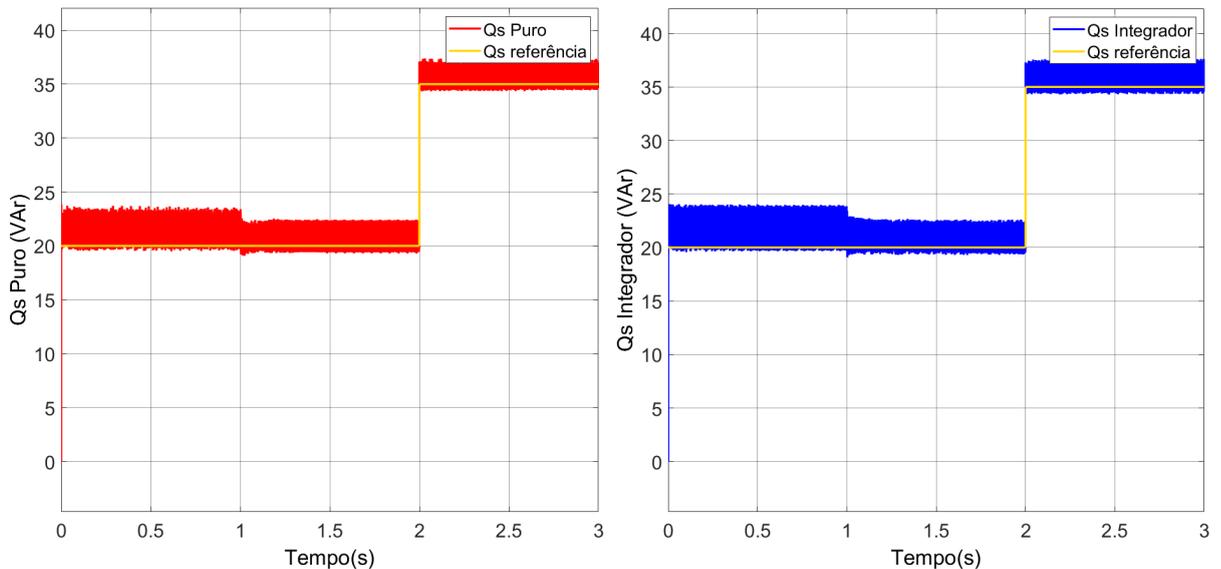
integrador praticamente não é afetado após o aumento da potência reativa. E por fim, entre 2 e 3 segundos, o método puro continua com quase 0.2 V de erro em regime permanente e o método com integrador com erro de 0.05 V, de acordo com a Figura 15d.

As referências de potência ativa geradas pelos blocos dos dois métodos, mostrados na Figura 16, se diferenciam nas transições mas são similares em regime permanente. Em relação à potência reativa, há uma variação em 1 segundo, quando cai o valor de referência de tensão dado. Ambos os resultados corresponderam a referência dada.

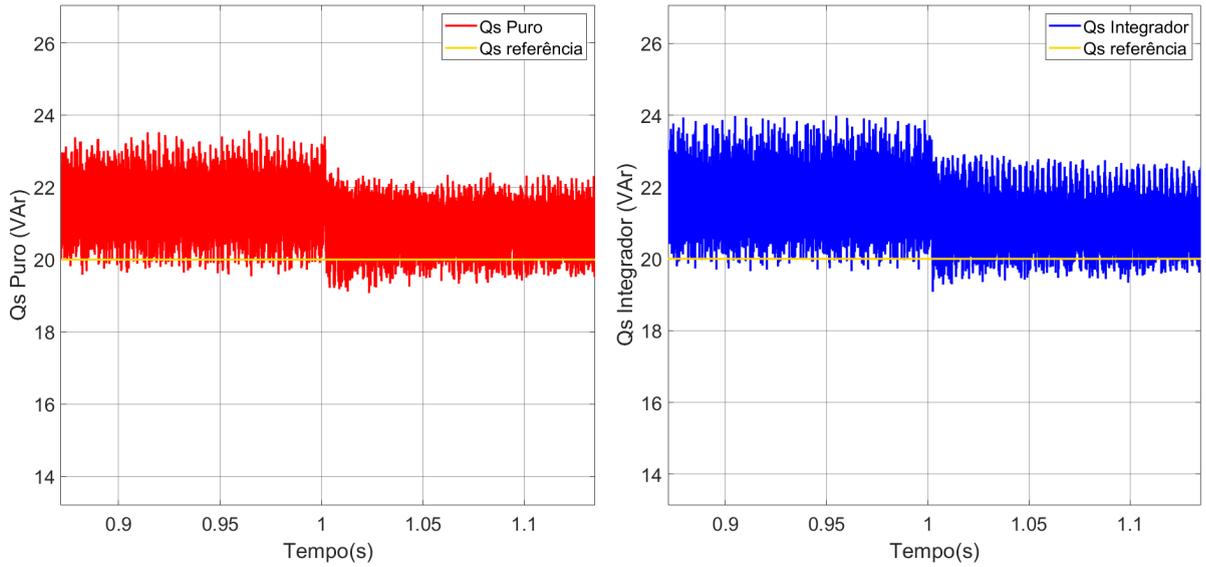
Figura 16 - Resultados de Potências do Retificador. a) Potência ativa de referência calculada e medida. b) Potência reativa de referência e medida. c) Efeito da mudança de referência de tensão na potência reativa.



a)



b)

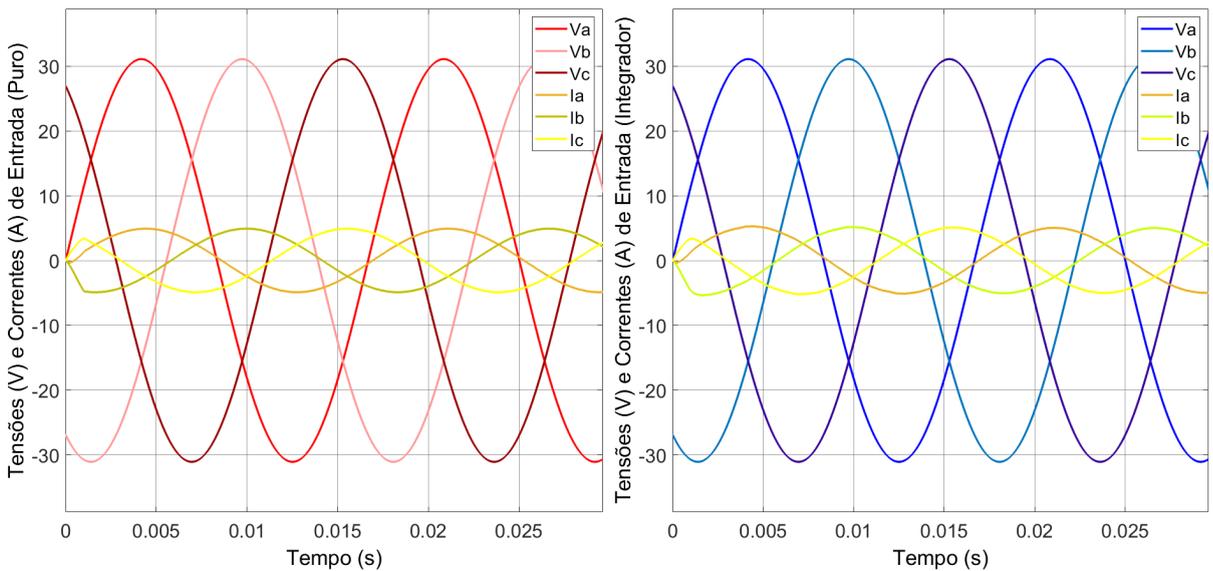


c)

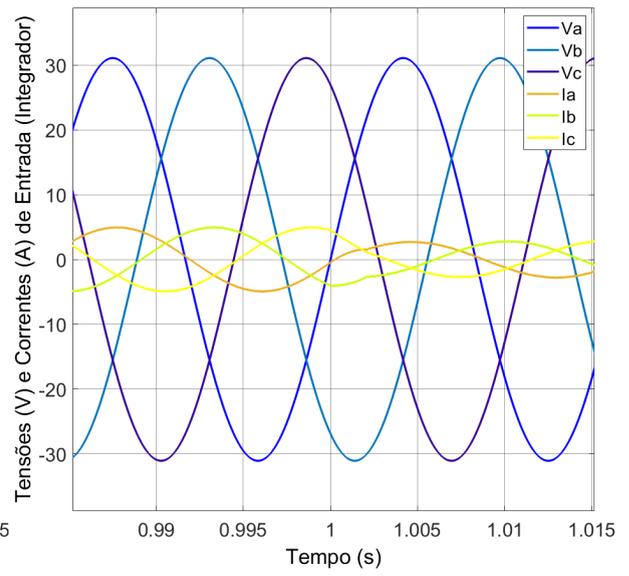
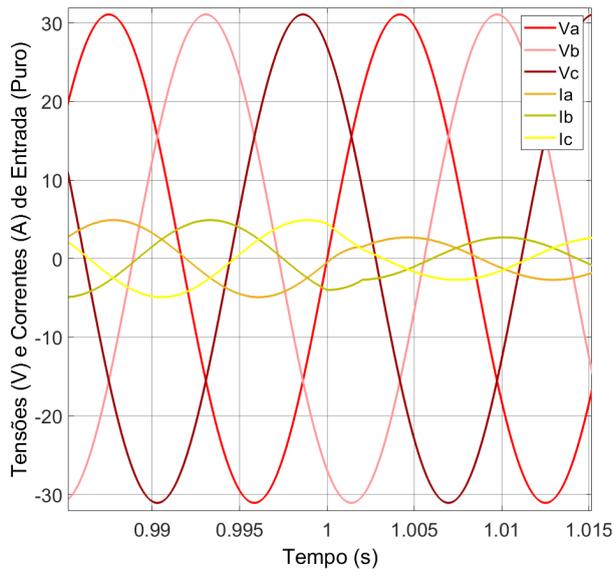
Fonte: Produção própria da autora

A entrada CA do retificador com suas correntes e tensões da fonte trifásica utilizada podem ser vistas na Figura 17. Ao atingir 1 segundo, no lado CA, a corrente cai devido a mudança da tensão de referência. Já ao atingir 2 segundos e a potência reativa aumentar de valor, pode-se ver um aumento do atraso da tensão em relação à corrente.

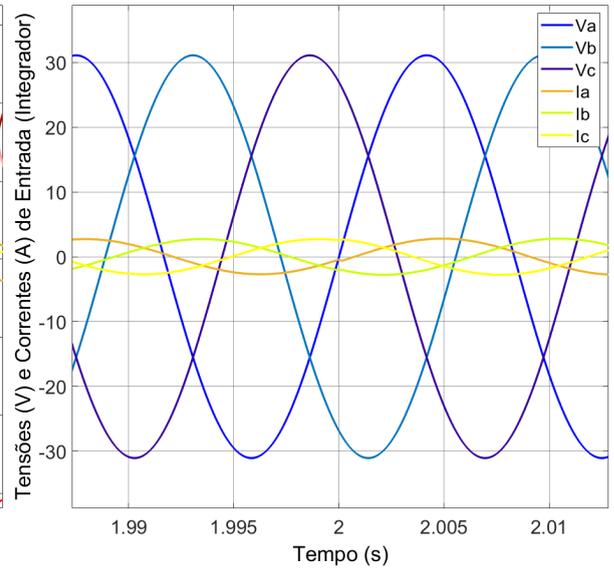
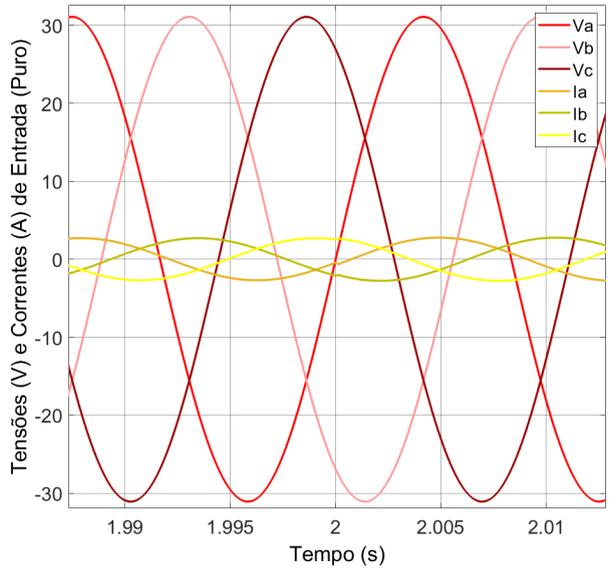
Figura 17 - Lado CA do retificador. a) Tensões e correntes na entrada do retificador. b) Mudança da corrente com a mudança da potência reativa de referência em 1 segundo. c) Mudança de fase no lado CA ao atingir 2 segundos.



a)



b)



c)

Fonte: Produção própria da autora

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os conceitos básicos do controle preditivo baseado em modelo dando ênfase ao controle dos elos de corrente contínua dos retificadores trifásicos front-end ativos. Uma revisão bibliográfica foi realizada indicando dois trabalhos utilizando controle preditivo baseado em modelo na literatura mais adequados para o controle do elo CC.

Em um dos trabalhos, foi apresentada uma forma pura de controle preditivo baseado em modelo para essa aplicação que era objeto de estudo principal. No outro trabalho, foi estudado o controle preditivo combinado com o uso de um integrador, como no controle linear convencional. Duas simulações foram desenvolvidas para testar os dois métodos apresentados para controle de um retificador.

Os resultados indicaram que para uma faixa de valores o controle proporciona uma boa resposta, seguindo o valor desejado que foi dado como referência, em ambas as simulações feitas. Há um erro em regime permanente que é pequeno para ambos os casos mas o tempo de resposta é maior para o método de controle preditivo puro.

Porém, em alguns casos, os valores dados para calcular a potência ativa de referência pode resultar em um valor negativo dentro da raiz quadrada, e isso gera um erro na simulação. Isso ocorre em ambas as simulações. Portanto, as simulações não funcionam bem para todos os valores de referência de tensão no elo CC e potência reativa dadas.

Por fim, os resultados dos métodos dos artigos foram replicados para os pontos de operação escolhidos nas simulações. Ao contrário do que era esperado, nenhuma das simulações teve um desempenho desejado devido às limitações apresentadas na Figura 13, onde não atendem às especificações de controle.

Para trabalhos futuros é proposta uma análise aprofundada da natureza das equações utilizadas para calcular a potência ativa de referência que gerou erros nas simulações. Espera-se também o aprimoramento da técnica em que o controle preditivo baseado em modelo possa ser bem sucedido em toda a faixa de valores de referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RODRIGUEZ, Jose; CORTES, Patricio. **Predictive control of power converters and electrical drives**. John Wiley & Sons, 2012.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 2006.

PÉREZ, Marcelo A.; FUENTES, Ricardo Lizana; RODRIGUEZ, José. Predictive control of DC-link voltage in an active-front-end rectifier. In: 2011 **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. IEEE, 2011. p. 1811-1816.

BOSE, Bimal K. Energy, environment, and advances in power electronics. In: **ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No. 00TH8543)**. IEEE, 2000. p. TU1-T14 vol. 1.

VAZQUEZ, Sergio et al. Model predictive control for power converters and drives: Advances and trends. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 2, p. 935-947, 2016.

KOURO, Samir et al. Model predictive control—A simple and powerful method to control power converters. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 56, n. 6, p. 1826-1838, 2008.

CORTÉS, Patricio et al. Predictive control in power electronics and drives. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 55, n. 12, p. 4312-4324, 2008.

CORTÉS, Patricio et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives. In: 2009 **IEEE International Conference on Industrial Technology**. IEEE, 2009. p. 1-7.

AGUILERA, Ricardo P.; QUEVEDO, Daniel E. Predictive control of power converters: Designs with guaranteed performance. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 11, n. 1, p. 53-63, 2014.

QUEVEDO, Daniel E. et al. Finite control set MPC of an AFE rectifier with dynamic references. In: **2010 IEEE International Conference on Industrial Technology**. IEEE, 2010. p. 1265-1270.

BRAGA, Henrique AC; BARBI, Ivo. Conversores estáticos multiníveis—Uma revisão. **SBA Controle & Automação**, v. 11, n. 01, p. 20-28, 2000.