



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

**MODELAGEM DE CÉLULA À COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO PARA
APLICAÇÕES *GRID-TIE***

ALEXANDRE DA SILVA FAGUNDES

**VITÓRIA – ES
2016**

ALEXANDRE DA SILVA FAGUNDES

**MODELAGEM DE CÉLULA À COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO PARA
APLICAÇÕES *GRID-TIE***

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Alexandre da Silva Fagundes, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Matheus Barbosa de Oliveira e Silva.

Coorientadora: Jussara Farias Fardin.

**VITÓRIA – ES
2016**

ALEXANDRE DA SILVA FAGUNDES

**MODELAGEM DE CÉLULA À COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO PARA
APLICAÇÕES *GRID-TIE***

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Prof. Matheus Barbosa de Oliveira e
Silva.
Orientador.**

**Prof. Dr^a. Jussara Farias Fardin.
Coorientadora.**

Prof. Alexandre Rabello Araújo.

Prof. Stéfani Vanussi Silva de Melo.

Vitória - ES, 2016

DEDICATÓRIA

Dedico esse projeto a toda minha família, amigos e namorada, que têm me ensinado a ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores pelo apoio e pelas condições propiciadas para o desenvolvimento desse trabalho, à família pelo suporte ao longo desses anos, e aos meus amigos que me apoiaram ao longo de todo o trajeto da graduação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética brasileira no ano de 2015.	14
Figura 2: Princípio de funcionamento de uma CaC.	19
Figura 3: CaCs empilhadas.	20
Figura 4: GUI do PSCAD.	23
Figura 5: Comportamento linearizado da CaC. Região de polarização.	26
Figura 6: Diagrama de blocos da CaC.	28
Figura 7: Modelagem da SOFC no software PSCAD.	29
Figura 8: Modelagem representativa das Perdas de Ativação no software PSCAD. ...	30
Figura 9: Modelagem representativa das Perdas de Concentração no software PSCAD.	31
Figura 10: Modelagem representativa das Perdas Ôhmicas no software PSCAD.	32
Figura 11: Conversor DC-DC <i>boost</i> com diodo anti-retorno.	42
Figura 12: Modo contínuo de condução de corrente.	43
Figura 13: Representação do controlador do conversor CC-CC no software PSCAD.	47
Figura 14: Inversor VSI modelado no software PSCAD.	48
Figura 15: Diagrama de obtenção dos sinais para o PWM.	49
Figura 16: Transformada de Clark para o Detector de sequência positiva.	50
Figura 17: Obtenção dos valores de $i_{\alpha L}$ e $i_{\beta L}$ do detector de sequência positiva.	51
Figura 18: Obtenção das potências ativas e reativas.	51
Figura 19: Obtenção dos valores instantâneos de tensão nos eixos alfa e beta.	52
Figura 20: Transformada Inversa de Clark do Detector de sequência positiva.	53
Figura 21: Transformada de Clarke para os valores instantâneos de tensão nos eixos alfa e beta.	54
Figura 22: Correntes instantâneas nos eixos alfa e beta.	55
Figura 23: Transformada inversa de Clark para obtenção das correntes instantâneas.	56
Figura 24: PWM.	57
Figura 25: Filtro LCL modelado no PSCAD.	57
Figura 26: Guia das simulações.	61
Figura 27: Curva volt-ampere da SOFC.	62

Figura 28: Curva P x I da SOFC.....	63
Figura 29: Corrente, tensão e potência da SOFC.	64
Figura 30: Fluxo de hidrogênio mediante variações de carga.	65
Figura 31: Comparação entre a tensão da SOFC e tensão de saída.	66
Figura 32: Rendimento x Carga da SOFC.....	67
Figura 33: Variação de carga utilizada para análise do rendimento.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre CaCs [6].	21
Tabela 2: Valores tabelados de entalpia e energia livre de Gibbs.	35
Tabela 3: Valores das constantes de capacidade térmica.	35
Tabela 4: Parâmetros para o dimensionamento do conversor CC-CC <i>boost</i>	44
Tabela 5: Valores de capacitância e indutância para D_{\min} e D_{\max}	45
Tabela 6: Resultados finais do conversor CC/CC.	46
Tabela 7: Parâmetros para determinação do filtro.	58
Tabela 8: Parâmetros do filtro LCL.	60

SIGLAS

CaC	Célula a Combustível
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
NASA	National Aeronautics and Space Administration
YSA	Yttria-Stabilized Zircônia
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
ZEV	Zero Emission Vehicle
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada

SÚMÁRIO

Conteúdo

Resumo	13
1 Introdução	14
1.1 Objetivos	15
1.2 Justificativa.....	16
2 Referencial teórico	17
2.1 Hidrogênio.....	17
2.2 Célula a combustível.....	18
2.2.1 Princípio de operação	18
2.2.2 Tipos de célula a combustível:.....	21
2.3 Vantagens e desvantagens	21
2.4 Power System Computer Aided Design	22
3 (SOFC) Solid Oxide Fuel Cell – Célula a combustível de óxido sólido.....	24
3.1 Tensão de Saída da SOFC.	24
3.1.1 Parâmetros da equação de Nernst.	26
3.1.2 – Perdas de Concentração.	31
3.1.3 Perdas Ôhmicas.....	32
4 Rendimento.....	33
4.1 A Energia Livre de Gibbs	33
4.1.1 Cálculo das entalpias em 1273K.....	36
4.1.2 Cálculo das entropias em 1273K.	37
5 Unidade de conversão de energia	42
5.1 Conversor CC-CC	42
5.1.1 Controle do conversor boost.....	46
5.2 Inversor VSI	47
5.2.1 Controle PQ.....	48

5.3	FILTRO LCL.....	57
6	Análise por Simulação e Resultados.....	61
7	Conclusão	68
	Apêndice.....	69
	A.1 - Parâmetros para o modelo da SOFC	69
	A.2 – Parâmetros para o cálculo das perdas de ativação e concentração.....	70
	Bibliografia.....	71

Resumo

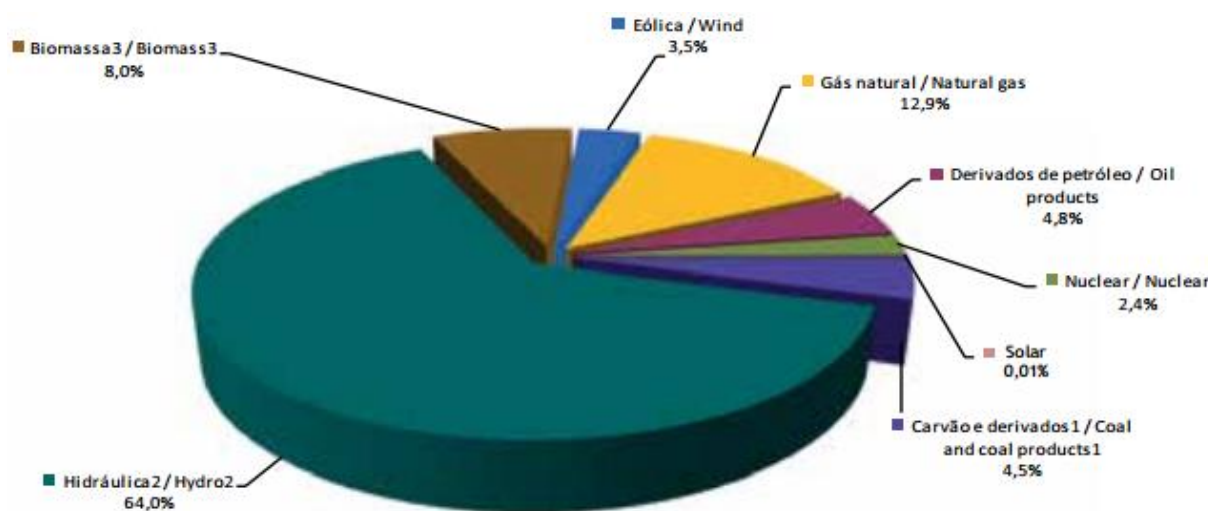
Células a combustível (CaCs) são dispositivos que geram energia elétrica por meio de reações eletroquímicas onde hidrogênio e oxigênio se combinam para formar água. Assemelham-se a uma bateria, com o diferencial de serem capazes de fornecer energia ininterruptamente, ou enquanto houver combustível. Possuem alta eficiência quando comparadas aos clássicos motores a combustão, podendo ainda fazer uso de cogeração, uma vez que altas temperaturas são produzidas na célula, podendo girar uma turbina ou mesmo ser usada no aquecimento de água para consumo.

Este projeto tem como proposta estudar a célula a combustível para aplicações *grid-tie*, demonstrando sua estabilidade mediante possíveis variações de carga por meio de simulações em um modelo computacional. Para tal, será utilizado o *software* PSCAD.

1 Introdução

A geração de energia no Brasil é em sua maioria de maneira tradicional, Geração Centralizada (GC), constituída de grandes hidrelétricas e termelétricas. A Figura 1 apresenta a matriz energética brasileira discriminada por fonte, segundo o Balanço Energético Nacional de 2016, referente ao ano de 2015:

Figura 1: Matriz energética brasileira no ano de 2015.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016).

Usinas hidrelétricas são limitadas quanto ao local de instalação, como por exemplo, próximas de rios, acarretando em longas linhas de transmissão para distribuição de energia. Longas linhas implicam em maiores perdas, afetando a eficiência do processo.

Analogamente à GC, temos a Geração Distribuída (GD), trata-se da instalação de pequenas unidades geradoras próximas às cargas, diminuindo custos com linhas de transmissão, perdas devido às longas linhas, diminuição dos impactos ambientais, propiciando alavancagem de uma nova indústria de energia no mercado, dando maior flexibilidade para reagir aos preços.

A GD obteve grande avanço quando em 17 de abril de 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou uma nova resolução normativa (482/2012) para facilitar a conexão à rede de gerações distribuídas a partir de fontes renováveis.

Esta resolução estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA), 2012, além de propor a criação de um sistema de compensação de energia já conhecido internacionalmente como *net metering*. Dessa forma, o proprietário de uma pequena usina não necessariamente precisa consumir toda a energia gerada no momento da geração, todo o excesso fica como crédito com validade de 60 meses para ser consumido posteriormente.

Alguns estados brasileiros deram um passo posterior no estímulo da geração distribuída, através da criação de leis especiais estabelecendo regras diferenciadas para a cobrança de ICMS (imposto sobre circulação de mercadorias e serviços) para clientes que possuem geração distribuída (ANEEL, 2014). Um exemplo desses Estados foi Minas Gerais, que publicou a Lei nº 20.824, de 31 de julho de 2013, estabelecendo que o ICMS no Estado deva ser cobrado apenas sobre a diferença positiva entre a energia consumida e a energia injetada pelos micro e mini geradores, pelo prazo de cinco anos. (MINAS GERAIS, 2013)

As GDs empregam fontes de energia renovável como eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), fotovoltaica, biomassa e célula a combustível, sendo esta última o foco do projeto.

A CaC é uma fonte renovável, que corrobora com a ideia de sustentabilidade e possui vantagem de geração de energia não intermitente, como ocorre com eólica e solar. A importância do estudo reside em testar a viabilidade técnica do sistema composto por CaC para uma aplicação *grid-tie*.

1.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho é modelar uma CaC de óxido sólido (SOFC) e conectá-la à rede. Para isso, será desenvolvido além do modelo da SOFC, o conversor CC-CC *boost*, seguido pelo inversor que por sua vez é controlado pela técnica PQ. Será realizado um estudo da qualidade de energia elétrica, mais especificamente relativo aos níveis de tensão na saída do inversor. Também será calculado o rendimento das células por meio da Energia Livre de Gibbs.

1.2 Justificativa

A CaC embora pareça uma tecnologia recente, foi criada por volta de 1800, levando mais de uma centena de anos para começar a ser utilizada.

O grande marco na história se deu na missão da NASA, Gemini (1962-1965). A CaC foi a fonte de energia escolhida visto vantagens em eficiência, peso, confiança, flexibilidade e etc.. Outra vantagem única para sua escolha foi a habilidade de gerar água potável como resíduo [19].

Desde sua aplicação pela NASA seu crescimento foi significativo, inicialmente patrocinado pela NASA e outras organizações dos Estados Unidos.

Ainda hoje as CaC são alvo de grandes investimentos, um dos maiores motivos é sem dúvida o petróleo. A busca por fontes renováveis de geração de energia vem de muito tempo, e se intensifica ao longo dos anos. Além disso, a dependência do petróleo, principalmente de grandes países, faz com que a importação deste combustível seja inevitável. Os dependentes como EUA fazem grandes investimentos em energias renováveis, incluído CaC. Califórnia, Connecticut, New York, Ohio e Carolina do Sul são exemplos de estados com investimentos pesados, tanto do governo como de indústrias como Toyota e Hyundai. Em Connecticut, Califórnia, Maryland, Massachusetts, New York, Oregon, Rhode Island e Vermont por exemplo, a meta é que em 2025 haja por volta de 3,3 milhões de veículos não emissores de poluentes, os *ZEVs* – (*zero emission vehicle*), podendo ou não serem movidos CaC, 1,5 milhão só na Califórnia. Em Ohio, até 2025, pelo menos 25% do suprimento de energia de todo o serviço de distribuição de energia e companhias de serviços elétricos será proveniente de fontes renováveis, sendo 12,5% constituído por energia eólica, hidrelétrica ou biomassa, 0,5% de energia solar, os outros 12% de fontes avançadas de geração de energia, incluindo nuclear, carvão limpo (purificação do carvão antes da queima) e células a combustível[20].

Tais investimentos em energias renováveis somados com o amplo leque de aplicações que as CaCs possuem, motivam o estudo da viabilidade técnica do sistema proposto nesse projeto de graduação, consistindo de uma CaC para aplicação *grid-tie*.

2 Referencial teórico

2.1 Hidrogênio

O hidrogênio é o combustível da célula a combustível, o elemento com mais energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido – 52000 BTUs (*British Thermal Units*) – por libra (ou 120,7 quilojoules por grama), isso é cerca de três vezes mais calor por libra que o petróleo estando em seu estado líquido [23].

O hidrogênio é o mais simples e leve elemento na terra. Em sua forma mais pura (H_2), é um gás inodoro e se combina facilmente com outros elementos, tornando difícil sua captação para o uso em células a combustível. Embora seja raro encontrá-lo em sua forma pura, é o elemento mais abundante na terra, presente em ácidos, hidrocarbonetos, água dentre outros compostos [24].

Necessita-se então, isolar o hidrogênio dos outros compostos. Existem várias formas de fazê-lo, a mais utilizada com objetivo de alimentar uma célula a combustível é através de reformadores, ou oxidação parcial, que consiste na produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis como gasolina e gás natural (CH_4).

O biocombustível também pode ser utilizado pelo reformador como fonte de hidrogênio. Processos naturais como fotossíntese e fermentação podem ser utilizados como fontes de entrada para o reformador. Por mais variados que os métodos de obtenção de hidrogênio sejam ainda não existe nenhum viável comercialmente.

A grande volatilidade (facilidade de mudar do estado líquido para o gasoso) lança um paradoxo quanto ao seu armazenamento, uma vez que seu estado líquido ocupa um volume 700 vezes menor que o gasoso. Armazená-lo em estado sólido implica em grandes riscos uma vez que pode escapar na forma de gás por pequenos orifícios, logo, seu armazenamento deve levar em conta a aplicação, para que os riscos sejam minimizados.

2.2 Célula a combustível

A célula a combustível é um dispositivo eletroquímico semelhante a uma bateria, ambos são constituídos por dois eletrodos, cátodo e ânodo, separados pelo eletrólito. A bateria funcionará enquanto houver substâncias para realizarem as reações de óxido-redução, sendo limitada, já a CaC pode operar de maneira contínua enquanto houver alimentação de combustível.

O combustível em questão é o hidrogênio, que reagindo com o oxigênio do ar, produz eletricidade, e tem como subproduto água e calor. A eficiência da célula gira em torno de 40-60%, a alta temperatura de operação de algumas CaCs como a SOFC, possibilita a cogeração, podendo ter sua eficiência melhorada para 80-90%, onde o calor pode ser utilizado para girar uma turbina ou mesmo no aquecimento de água para consumo [6].

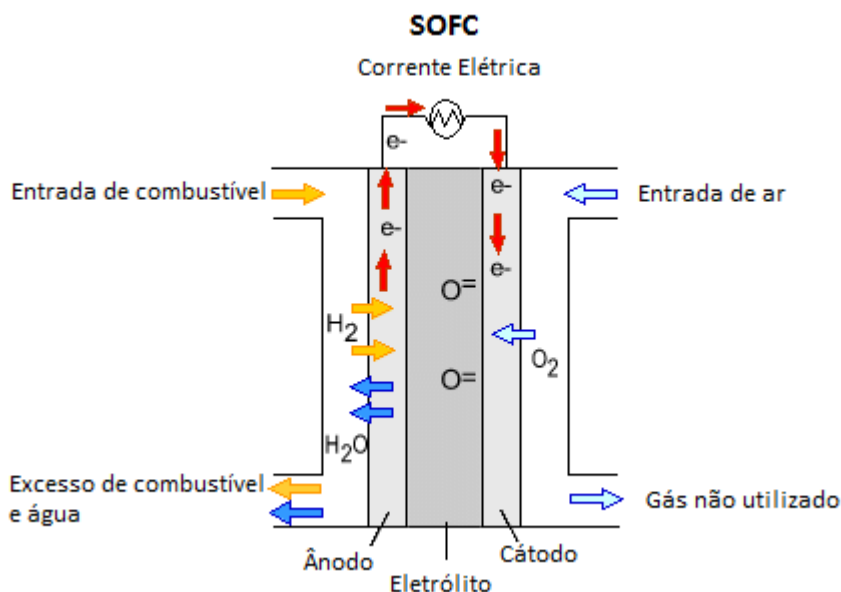
A célula a combustível não apresenta limitações geográficas como energia eólica, fotovoltaica e PCHs, podendo ser instalada em qualquer lugar no sistema de distribuição.

2.2.1 Princípio de operação

A estrutura de uma CaC é similar à de uma bateria, reações de oxido-redução ocorrem gerando energia, com a exceção da possibilidade de alimentação contínua de combustível. Ânodo e cátodo estão separados por um eletrólito.

O combustível (hidrogênio ou monóxido de carbono) é injetado no ânodo e o oxigênio é injetado no cátodo, nas SOFCs particularmente, o oxigênio é que atravessa o eletrólito. O oxigênio então se combina com o hidrogênio para formar água e energia, como mostra a Figura 2. A água gerada deve ser removida de modo a não interromper as reações eletroquímicas.

Figura 2: Princípio de funcionamento de uma CaC.

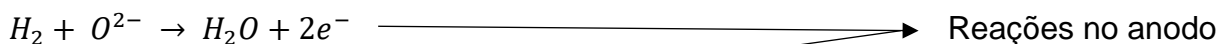


Fonte: www.fuelcellmarkets.com

As reações básicas que ocorrem na CaC são dadas pelas Equações (1) e (2) respectivamente:

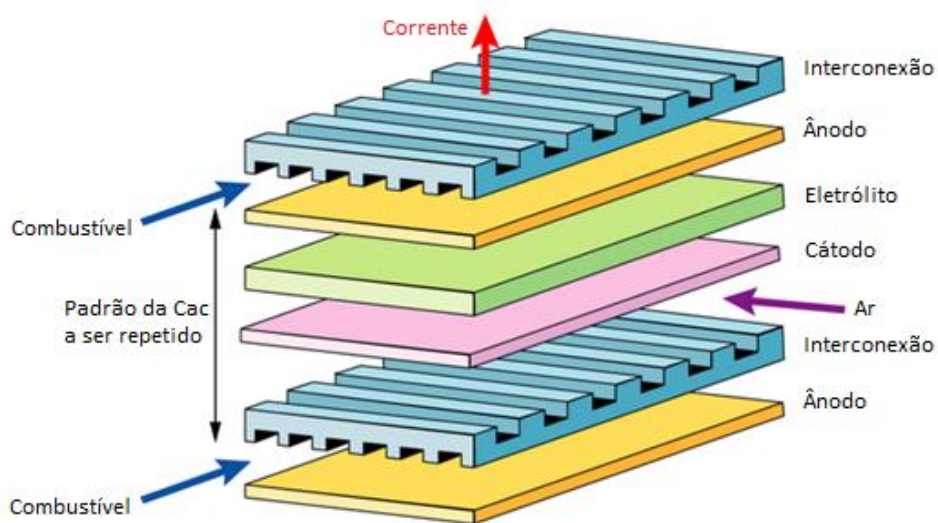


No caso de monóxido de carbono, as reações que decorrem no anodo, cátodo e reação global são [6]:



As células a combustível são empilhadas uma sobre a outra, conectadas em série ou paralelo, dependendo da aplicação. Um separador bipolar separa as células (ânodo, eletrólito e cátodo) consecutivas, onde o número de células depende da potência de saída desejada como mostra a Figura 3.

Figura 3: CaCs empilhadas.



Fonte: www.doitpoms.ac.uk

2.2.2 Tipos de célula a combustível:

As células a combustível são classificadas basicamente quanto a constituição do seu eletrólito. A Tabela 1 a seguir mostra alguns tipos de CaCs ordenadas pela sua temperatura de operação:

Tabela 1: Comparativo entre CaCs [6].

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatura de Operação	< 352.6K	~477.6K	~1250K	~1255.4K
Pressão de operação	1-5 atm	1-8 atm	1-3 atm	1-13 atm
Faixa de Potência	3-250kW	100-200kW	250kW-10MW	1kW-10MW
Eficiência	35-40%	35-40%	50-55%	45-50%
Combustível	H ₂	H ₂	H ₂ , CO, CH ₄	H ₂ ,CO,CH ₄ , NH ₃

Fonte: Nagasmitha Akkinapragada. *Dynamic Modeling and Simulations of Solid Oxide Fuel Cells for Grid-Tied Applications*, 2007

Onde:

PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*

PAFC - *Phosphoric Acid Fuel Cell*

MCFC - *Molten Carbonate Fuel Cell*

SOFC - *Solid Oxide Fuel Cell*

2.3 Vantagens e desvantagens

Onde há água, há hidrogênio e oxigênio. Em um mundo onde quase 75% da superfície é água, não há como negar a posição de destaque de uma fonte de energia renovável que tem como entrada o hidrogênio, componente da água. Seguem algumas vantagens das CaCs:

- Alta eficiência.
- Energia limpa, livre de carbono.
- Não é necessário recarregar, pode funcionar continuamente enquanto houver combustível.
- Sem partes móveis, o que diminui ruídos provenientes de vibrações.
- Combustível pode ser obtido da água, elemento abundante na terra.

Embora seja uma tecnologia atraente do ponto de vista sustentável, algumas desvantagens, atualmente, limitam seu potencial, como segue abaixo:

- Alto custo, tanto por conta do pequeno mercado, como por conta de alguns materiais envolvidos como platina.
- O uso do hidrogênio como combustível ainda não é confiável, seu armazenamento está sujeito a explosões devido sua alta volatilidade.
- Pode se tornar irrelevante em muitas aplicações caso baterias avancem tecnologicamente.

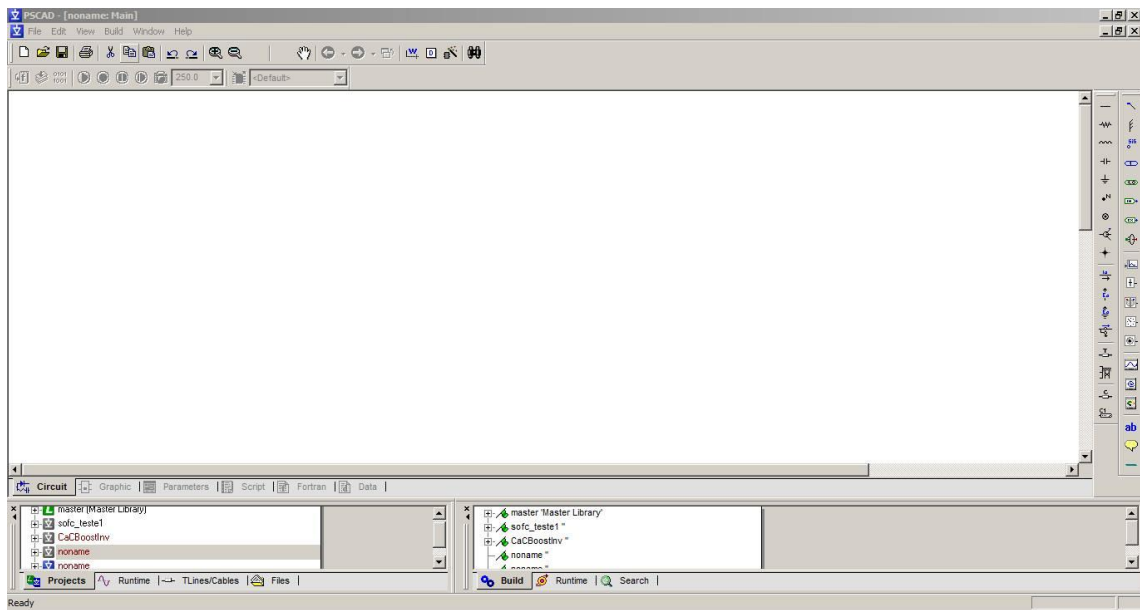
Dentre os vários tipos de CaCs citados na Tabela 1, a escolhida foi a SOFC pois:

- Como todos os componentes são sólidos, a corrosão do eletrodo é nula.
- A alta temperatura de operação embora exija materiais mais resistentes, elimina o uso de catalisadores caros como platina.
- Altas temperaturas aumentam a eficiência da CaC por meio de cogeração.

2.4 *Power System Computer Aided Design*

O *Power System Computer Aided Design* (PSCAD) é um *software* que permite a criação e realização de simulações *online* (HVDC, 2015). Foi desenvolvido pela *Manitoba HVDC Research Center*, uma empresa canadense especializada no desenvolvimento de *softwares* para simulação de sistemas de potência. Foi baseado no *Electromagnetic Transients Including DC* (EMTDC), e. A Figura 4 traz a GUI (*graphical user interface*) do *software*:

Figura 4: GUI do PSCAD.



Fonte: Próprio autor

3 (SOFC) *Solid Oxide Fuel Cell* – Célula a combustível de óxido sólido

SOFC é uma célula a combustível que usa como eletrólito um meio sólido, ítrio estabilizada com zircônia (YSZ), que consiste em uma cerâmica onde a estrutura cristalina Zircônia é estabilizada via adição de Ítrio. A YSZ é o eletrólito mais utilizado em SOFC, pois possui um adequado nível de condutividade iônica, e exibe estabilidade em ambas as atmosferas, oxidante e redutora, além de apresentar excelentes propriedades mecânicas [21].

Opera em altas temperaturas, entre 800°C e 1000°C, tendo alto potencial em unidades estacionárias de produção de energia. Sua eficiência gira em torno de 45-50% e, quando integrada com uma turbina a gás, sua eficiência pode chegar a 70-75%. A técnica de utilizar o subproduto da geração de energia via reações químicas, nesse caso o calor, dá-se o nome de cogeração [6].

Sua alta temperatura de operação reduz o custo com catalisadores, além de permitir uma maior variedade de combustíveis como entrada reduzindo o custo com reformadores. Entretanto, altas temperaturas diminuem a durabilidade e robustez, necessitando de materiais mais sofisticados. As SOFCs possuem flexibilidade quanto ao combustível, para a análise deste projeto utilizaremos o hidrogênio como combustível.

3.1 Tensão de Saída da SOFC.

A tensão de operação (V_{fc}) da célula a combustível para uma corrente I obtida aplicando-se a equação de Nernst e considerando as perdas é mostrada a seguir [10]:

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{conc} - rI \quad (5)$$

Onde E é a tensão a vazio ideal denominada tensão de Nernst.

$$E = N \left(E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) \right) \quad (6)$$

E - Tensão de circuito aberto (V)

E^0 – Tensão padrão da célula a combustível (V).

p_i - Pressão parcial do elemento i (Pa).

V_{act} - Queda de tensão devido a perdas de ativação (V).

V_{conc} - Queda de tensão devido às perdas de concentração (V).

r - Resistência interna da célula (Ω)

I - Corrente da célula (A).

N - Número de células.

R - Constante universal dos gases (J/mol.K)

T – Temperatura da célula (K)

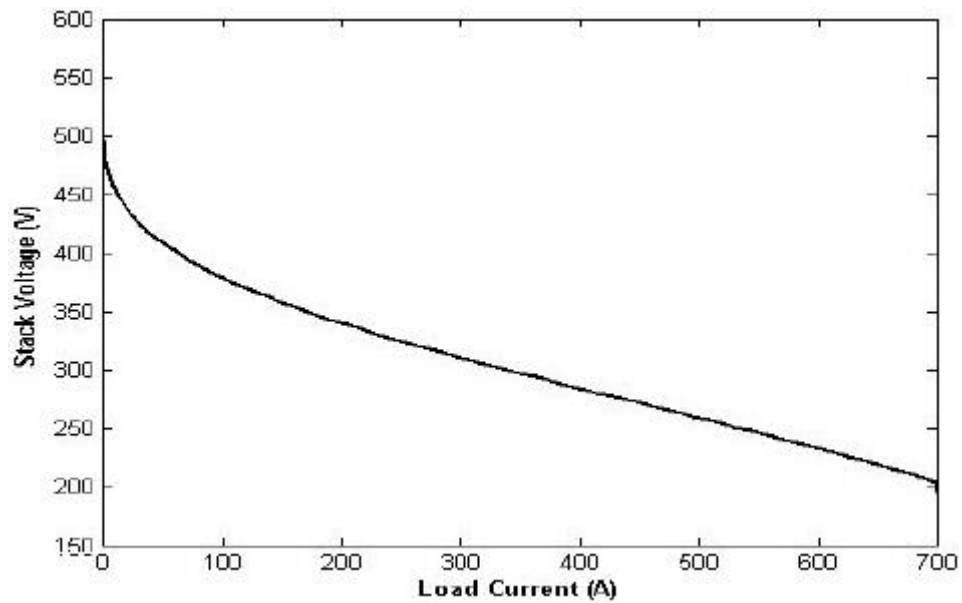
F - Constante de Faraday (C/mol)

Os valores dos parâmetros acima estão no Apêndice A1. A perda na ativação V_{act} é devido à baixa taxa de reações eletroquímicas entre o combustível (H_2) e o oxidante (O_2), mas é significativa em baixas correntes. Parte da tensão é perdida para que as reações se iniciem. As perdas de concentração V_{conc} são significativas em altas correntes, é resultado das variações em concentração dos reagentes na superfície do eletrólito conforme o combustível é consumido. As perdas de ativação e de concentração são também conhecidas como perdas de polarização. A variação nas concentrações afeta a tensão de saída (Nernst). As perdas devido à resistência interna são basicamente devido ao material do eletrólito.

As células a combustível sofrem queda de tensão com o aumento de corrente, comportamento típico de queda de tensão. Uma vez que neste trabalho teremos 384 células de 1,18V cada, a tensão de saída em circuito aberto será 453V, que

decrece com o aumento da corrente na carga [6]. A Figura 5 ilustra tal comportamento, onde é possível observar uma região linear no centro, conhecida como região de polarização ôhmica. Esta é a região de operação da célula a combustível.

Figura 5: Comportamento linearizado da CaC. Região de polarização.



Fonte: Nagasmitha Akkinapragada. *Dynamic Modeling and Simulations of Solid Oxide Fuel Cells for Grid-Tied Applications*, 2007.

3.1.1 Parâmetros da equação de Nernst.

Pressões parciais de hidrogênio, oxigênio e água são dadas pelas Equações (7), (8) e (9). A corrente da célula é representada pela equação (10) [8].

$$p_{H_2} = \left(\frac{\frac{1}{KH_2}}{1 + \tau_{H_2} s} \right) \cdot (q_{H_2} - 2K_r I) \quad (7)$$

$$p_{O_2} = \left(\frac{\frac{1}{KO_2}}{1 + \tau_{O_2} s} \right) (q_{O_2} - K_r I) \quad (8)$$

$$p_{H_2O} = \left(\frac{\frac{1}{KH_2O}}{1 + \tau_{H_2O} s} \right) \cdot (2K_r I) \quad (9)$$

$$I = \left(\frac{I_{ref}}{1 + \tau_e s} \right) \quad (10)$$

I_{ref} é a corrente de referência que pode ser calculada pela Equação (11). O fluxo de hidrogênio e oxigênio é calculado pelas Equações (12) e (13) [8]:

$$I_{ref} = \left(\frac{P_{ref}}{V_{ref}} \right) \quad (11)$$

$$qH_2 = \frac{2.K_r}{U_{opt}} \cdot \left(\frac{1}{1+\tau_f.s} \right) \quad (12)$$

$$qO_2 = \frac{qH_2}{r_{HO}} \quad (13)$$

A razão entre o combustível que reage e o combustível que entra na célula é calculada pela Equação (14) [9]. O combustível que reage é calculado pela Equação (15) [9]:

$$U_f = \frac{qH_2^r}{qH_2} \quad (14)$$

$$qH_2^r = 2K_r I \quad (15)$$

qH_2 - Fluxo de hidrogênio (mol/s)

qO_2 - Fluxo de oxigênio (mol/s)

KH_2 - Constante de fluxo molar para o hidrogênio (kmol/s atm)

kO_2 – Constante de fluxo molar para o oxigênio (kmol/s atm)

KH_2O - Constante de fluxo molar para a água (kmol/s atm)

τ_{H_2} – Tempo de resposta para o fluxo de hidrogênio (s)

τ_{O_2} - Tempo de resposta para o fluxo de oxigênio (s)

τ_{H_2O} - Tempo de resposta para o fluxo de água (s)

τ_e - Tempo de resposta elétrico (s)

τ_f - Tempo de resposta do combustível (s)

r_{HO} - Razão de hidrogênio para oxigênio

N – Número de células empilhadas

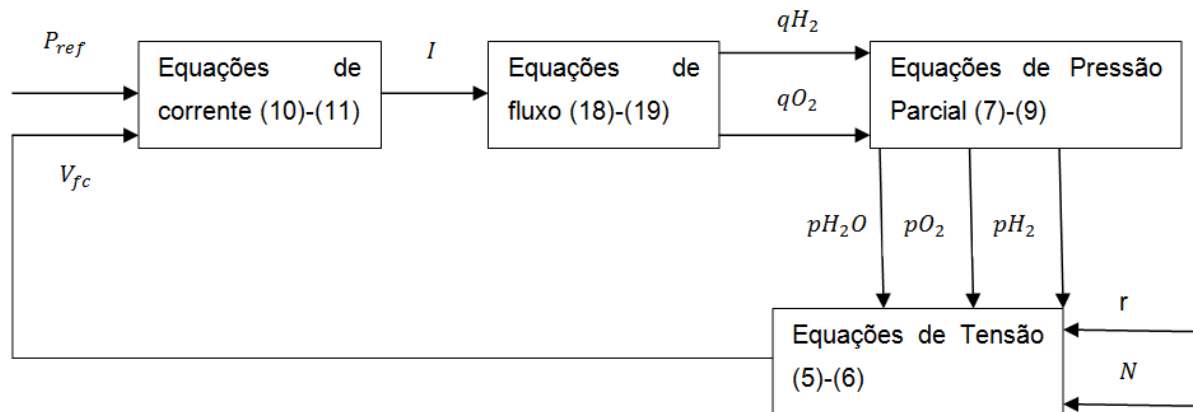
K_r - Constante, $K_r = N/4F$ (kmol/s A)

P_{ref} - Potência de referência (kW)

O tempo de resposta elétrico em CaCs é rápido em geral, sendo associado com a velocidade em que as reações químicas são capazes de restaurar a potência absorvida pela carga.

A Figura 6 consta de um diagrama de blocos resumindo a aplicação de todos os parâmetros apresentados até o momento. Os valores das constantes se encontram no Apêndice A.1

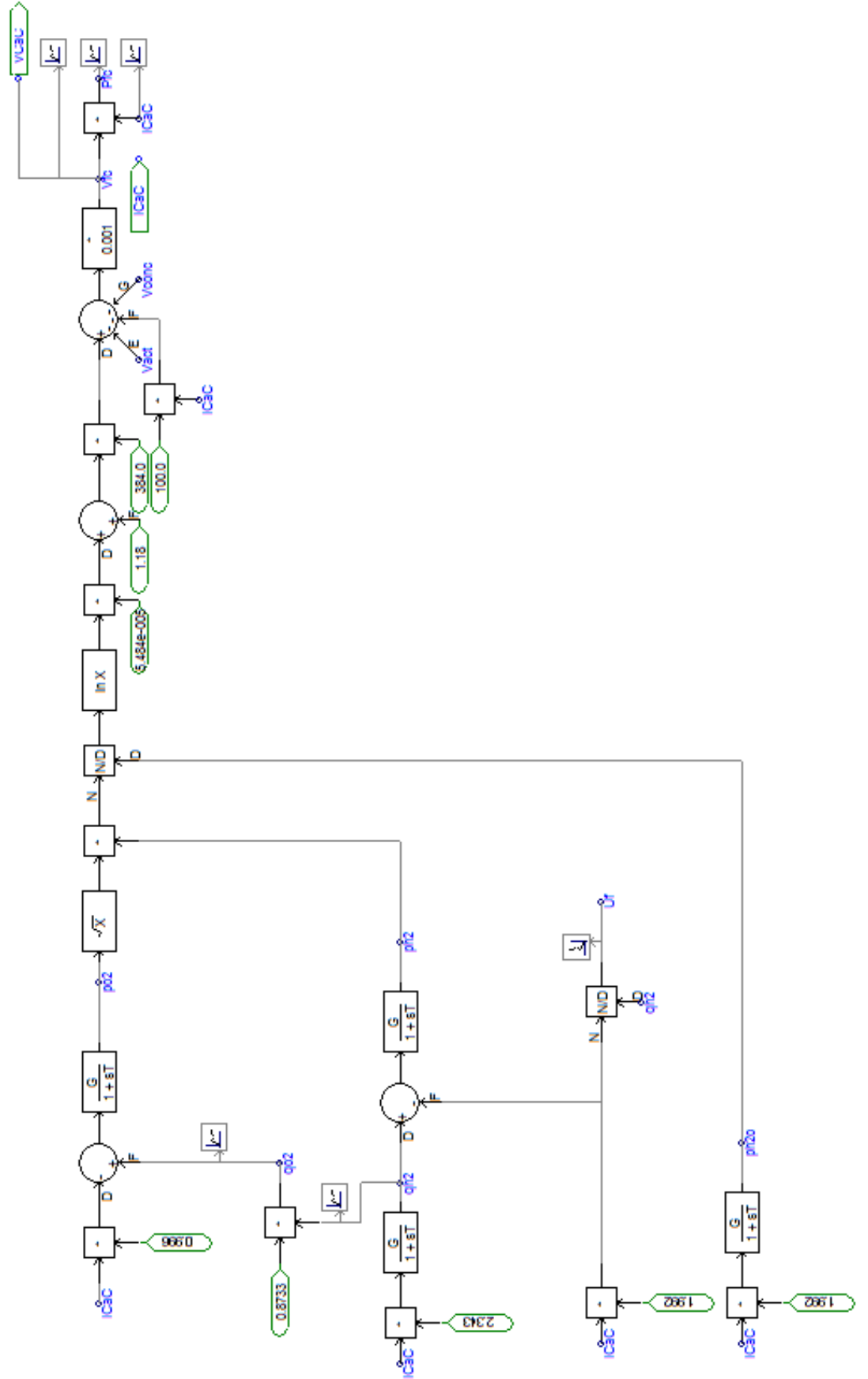
Figura 6: Diagrama de blocos da CaC.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 7 representa a modelagem no *software* PSCAD:

Figura 7: Modelagem da SOFC no software PSCAD.



Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Perdas de Ativação.

Acentuada nas regiões de baixa corrente, se dá principalmente devido à baixa taxa de reações eletroquímicas na superfície do eletrodo, onde há oxidação ou redução nas reações da CaC. Pode ser representada pela Equação (16) [11]:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \cdot \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (16)$$

Onde

η_{act} – Perdas de ativação (V).

R – Constante Universal dos gases (J/mol.K).

T – Temperatura (K).

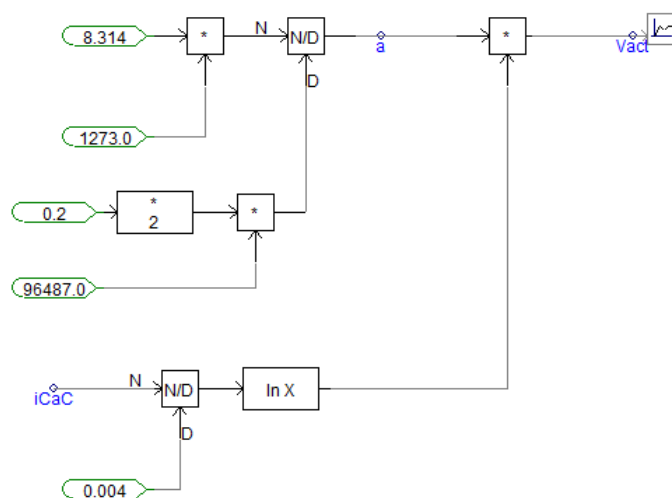
n – Número de elétrons envolvidos.

i – Corrente da CaC. (A)

i_0 - Corrente de troca (A).

Os valores adotados constam no Apêndice A.2. A Figura 8 apresenta a modelagem representativa das Perdas de Ativação no *software* PSCAD:

Figura 8: Modelagem representativa das Perdas de Ativação no software PSCAD.



Fonte: Próprio autor.

3.1.2 – Perdas de Concentração.

Ocorrem em toda faixa de densidade de corrente, mas se tornam mais altas em altas correntes onde há dificuldade para o gás reagente chegar até o local de reações na CaC. A perda de Concentração pode ser representada pela equação (17) [11]:

$$\eta_{con} = \left(\frac{RT}{nF}\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_{\Delta}}\right) \quad (17)$$

Onde:

η_{con} - Perda por Concentração (V)

R – Constante Universal dos gases (J/mol.K).

T – Temperatura (K).

n – Número de elétrons

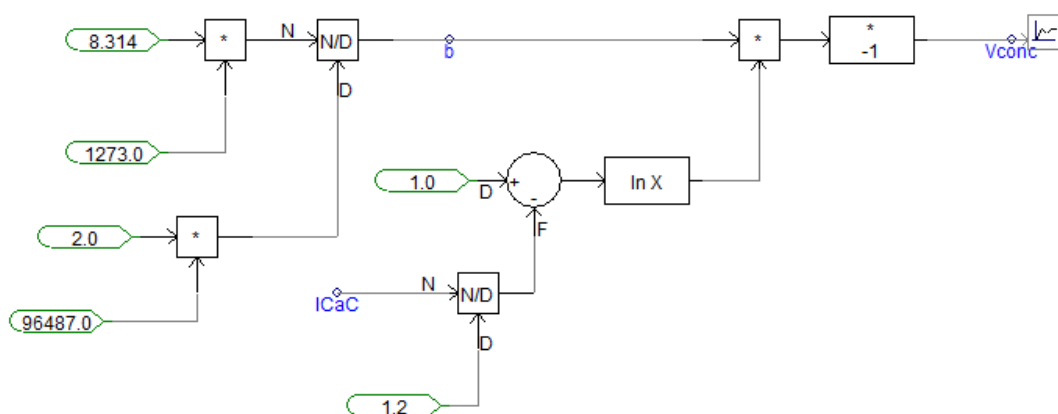
F – Constante de Faraday (C/mol)

i – Corrente da CaC. (A)

i_{Δ} – Corrente limite (A)

Os valores adotados constam no Apêndice A.2. Sem seguida, a Figura 9 consiste na modelagem representativa das Perdas por Concentração no software PSCAD:

Figura 9: Modelagem representativa das Perdas de Concentração no software PSCAD.



Fonte: Próprio autor.

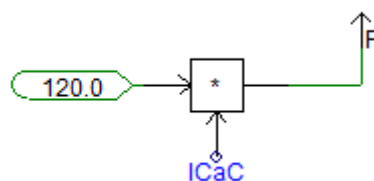
3.1.3 Perdas Ôhmicas.

As perdas ôhmicas variam proporcionalmente ao aumento da corrente, durante todos os possíveis valores de corrente da CaC, isso ocorre devida a resistência interna da CaC. É representado pela equação (18) [11]:

$$\eta_{ohm} = ir \quad (18)$$

Onde η_{ohm} é a Perda Ôhmica, r a resistência da célula e I a corrente. Os valores adotados constam no Apêndice A.2. A Figura 10 representa a modelagem das Perdas Ôhmicas no software PSCAD:

Figura 10: Modelagem representativa das Perdas Ôhmicas no software PSCAD.



Fonte: Próprio autor.

4 Rendimento

Diferentemente as formas de geração de energia mais populares, onde a geração de energia elétrica se dá a partir da energia mecânica, como hidrelétricas, energia eólica, termelétricas (ocorrem reações químicas para geração de calor e movimentação de massas de ar, que giram a turbina), as células a combustível têm sua fonte primária de energia a partir de reações químicas.

Dessa forma, não podemos usar a clássica relação de potência de saída sobre potência de entrada para o cálculo do rendimento, é preciso analisar as reações químicas. Uma vez que a energia é obtida pelo fluxo de elétrons que se movem para um circuito externo a célula, é necessário ter ciência de quais elementos, dos produtos tanto quanto dos reagentes devemos considerar para a obtenção da eficiência da SOFC. Logo, temos que recorrer à estequiometria das reações para o cálculo do rendimento por meio da energia livre de Gibbs.

4.1 A Energia Livre de Gibbs

A energia livre de Gibbs condiz a toda energia disponível para realização de trabalho externo. Considerando um sistema sem perdas, o trabalho elétrico (τ) pode ser aproximado como sendo igual à energia livre de Gibbs. Logo, o trabalho para mover dois elétrons pode ser expresso como [11]:

$$\tau = \Delta G = -n.F.E \quad (19)$$

Onde ΔG é a energia livre de Gibbs, n corresponde ao número de mols, F é a constante de Faraday e E é a energia potencial elétrica.

Dessa forma, podemos reescrever a Equação (19) isolando a tensão e substituindo n .

$$E = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (20)$$

Considerando a célula a combustível operando de maneira estável, com pressão e temperatura constantes, podemos calcular a energia livre de Gibbs em função de sua Entalpia (ΔH), Entropia (ΔS) e temperatura de operação. Uma vez que a entalpia corresponde à energia interna total de um sistema e a entropia é a energia que não pode ser transformada em trabalho, correspondendo a energia dissipada, podemos então relacionar as grandezas termodinâmicas da seguinte forma [11]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (21)$$

Devemos levar em consideração a estequiometria da reação para os cálculos da entalpia e entropia de formação. A partir da Equação Global (3) obtemos a expressão ΔH e ΔS :



$$\Delta H = \Delta H_{H_2O,T} - \Delta H_{H_2,T} - \frac{1}{2} \Delta H_{O_2,T} \quad (22)$$

$$\Delta S = \Delta S_{H_2O,T} - \Delta S_{H_2,T} - \frac{1}{2} \Delta S_{O_2,T} \quad (23)$$

Os valores de entalpia e entropia são tabelados para 1atm e 298K, entretanto, a célula em questão opera a 1273K. De acordo com Por meio de capacidades de calor, podemos calcular a entalpia e entropia para qualquer temperatura [12].

$$\Delta H_T = \Delta H_{298} + \int_{298}^T C_p dT \quad (24)$$

$$\Delta S_T = \Delta S_{298} + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT \quad (25)$$

A capacidade de calor é função da temperatura e pode ser calculada por meio de uma expressão empírica [12].

$$\frac{C_p}{R} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2} \quad \text{Para gases ideais} \quad (26)$$

$$\frac{c_p}{R} = A + B.T + C.T^2 \quad \text{Para líquidos} \quad (27)$$

A máxima eficiência de uma célula a combustível é geralmente relacionada à sua eficiência termodinâmica, e pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\eta_{m\acute{a}x} = \frac{\Delta G_T}{\Delta H_T} \times 100 \quad (28)$$

As entalpias e energia livre de Gibbs de formação são tabeladas de acordo com a Tabela 2, os dados a seguir foram retirados da Tabela C.4 de [12] para substâncias a 298K.

Tabela 2: Valores tabelados de entalpia e energia livre de Gibbs.

Espécie Química	Estado	$\Delta H^{\circ}_{f, 298} / \text{J mol}^{-1}$	$\Delta G^{\circ}_{f, 298} / \text{J mol}^{-1}$
H ₂	Gás	0	0
O ₂	Gás	0	0
H ₂ O	Líquido	-285830	-237129

Fonte: Tabela C.4 de [12].

Os valores das constantes A, B, C e D da Tabela 3 também são tabelados e foram obtidos a partir da Tabela C.1 e C.3 de [12].

Tabela 3: Valores das constantes de capacidade térmica.

Espécie Química	Estado	A	10 ³ B	10 ⁶ C	10 ⁻⁵ D
H ₂	Gás	3.249	0.422	0	0.083
O ₂	Gás	3.639	0.506	0	-0.227
H ₂ O	Líquido	8.712	1.25	-0.18	

Fonte: Tabelas C1 e C3 de [12].

4.1.1 Cálculo das entalpias em 1273K.

A SOFC em análise opera a 1273K, por isso devemos calcular as entalpias, entropias e energias livre de Gibbs para tal temperatura.

- H_2O

De (24) e (26) temos:

$$\Delta H_{H_2O,1273} = \Delta H_{H_2O,298} + R \cdot \int_{298}^{1273} (A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2}) dT$$

Substituindo os valores das constantes pelos valores das Tabelas 2 e 3:

$$\Delta H_{H_2O,1273} = -204456,9573 \frac{J}{MOL} \quad (29)$$

- H_2

De (24) e (26), agora para o hidrogênio:

$$H_{H_2,1273} = \Delta H_{H_2,298} + R \cdot \int_{298}^{1273} (A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2}) dT$$

Substituindo os valores das constantes pelos valores das Tabelas 2 e 3:

$$\Delta H_{H_2,1273} = 29023,9160 \frac{J}{mol} \quad (30)$$

- O_2

De maneira análoga, agora para o oxigênio:

$$H_{O_2,1273} = \Delta H_{O_2,298} + R \cdot \int_{298}^{1273} (A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^{-2}) dT$$

Substituindo os valores das constantes pelos valores das Tabelas 2 e 3:

$$\Delta H_{O_2,1273} = 32720,1745 \frac{J}{mol} \quad (31)$$

4.1.2 Cálculo das entropias em 1273K.

As entropias não são fornecidas de maneira direta, para seu cálculo utilizamos a Tabela 2 e a Equação (21) para obter os valores da entalpia em 298K.

- H_2O

$$\Delta G_{H_2O,298} = \Delta H_{H_2O,298} - T \cdot \Delta S_{H_2O,298}$$

$$\Delta S_{H_2O,298} = - \frac{(\Delta G_{H_2O,298} - \Delta H_{H_2O,298})}{T}$$

Substituindo os valores das constantes pelos valores das Tabelas 1:

$$\Delta S_{H_2O,298} = -44,4497 \frac{J}{mol.K} \quad (32)$$

Agora podemos proceder para o cálculo das entalpias via Equação (25) e Tabela 3.

$$\Delta S_{H_2O,T} = \Delta S_{H_2O,298} + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT$$

$$\Delta S_{H_2O,T} = \Delta S_{H_2O,298} + R \cdot \left[A \cdot \ln T + B \cdot T + C \frac{T^2}{2} - D \cdot \frac{T^{-2}}{2} \right]_{298}^T$$

$$\Delta S_{H_2O,1273} = 53,6444 \frac{J}{mol.K} \quad (33)$$

- H_2

$$\Delta G_{H_2,298} = \Delta H_{H_2,298} - T \cdot \Delta S_{H_2,298}$$

Substituindo os valores das constantes pelos valores das Tabelas 1:

$$\Delta S_{H_2,298} = 0 \quad (34)$$

Agora podemos proceder para o cálculo das entalpias via Equação (25) e Tabela (3).

$$\Delta S_{H_2,T} = \Delta S_{H_2,298} + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT$$

$$\Delta S_{H_2,T} = \Delta S_{H_2,298} + R \cdot \left[A \cdot \ln T + B \cdot T + C \frac{T^2}{2} - D \cdot \frac{T^{-2}}{2} \right]_{298}^T$$

$$\Delta S_{H_2,1273} = 42,6435 \frac{J}{mol.K} \quad (35)$$

• O_2

Analogamente:

$$\Delta S_{O_2,298} = 0 \quad (36)$$

Via Equação (25) e Tabela (3):

$$\Delta S_{O_2,T} = \Delta S_{O_2,298} + \int_{298}^T \frac{C_p}{T} dT$$

$$\Delta S_{O_2,T} = \Delta S_{O_2,298} + R \cdot \left[A \cdot \ln T + B \cdot T + C \frac{T^2}{2} - D \cdot \frac{T^{-2}}{2} \right]_{298}^T$$

$$\Delta S_{O_2,1273} = 48,0326 \frac{J}{mol.K} \quad (37)$$

Com todas as entalpias, entropias e energia livre de Gibbs calculadas, retornamos para a Equação (20), para o cálculo da tensão máxima teórica, lembrando que nossos dados foram calculados em unidade por mol, logo a molaridade deve ser considerada.

$$E = -\frac{\Delta G}{2F}$$

Para a energia livre de Gibbs, de acordo com a Equação (21), é necessário calcular a entropia via Equação (23), logo:

$$\Delta S_{1273} = \Delta S_{H_2O,1273} - \Delta S_{H_2,1273} - \frac{1}{2} \times \Delta S_{O_2,1273}$$

$$\Delta S_{1273} = 53,6444 - 42,6435 - \frac{1}{2} \times (48,0326)$$

$$\Delta S_{1273} = -13,0154 \frac{J}{mol.K}$$

Calculando separadamente, a partir da equação (22) para a entalpia ΔG temos:

$$\Delta H_{1273} = \Delta H_{H_2O,1273} - \Delta H_{H_2,1273} - \frac{1}{2} \times \Delta H_{O_2,1273}$$

$$\Delta H_{1273} = -204456,9573 - (29023,916) - \frac{1}{2} \times (32720,1745)$$

$$\Delta H_{1273} = -249840,96055 \frac{J}{mol} \quad (38)$$

Da Equação (21):

$$\Delta G_{1273} = \Delta H_{1273} - T \cdot \Delta S_{1273}$$

$$\Delta G_{1273} = -249840,096055 - 1273(-13,0154)$$

$$\Delta G_{1273} = -233272,35635 \frac{J}{mol.K}$$

Agora podemos calcular a tensão máxima teórica a partir da Equação (20):

$$E = -\frac{\Delta G}{2F}$$

$$E = -\left(-\frac{233272,35635}{2 \times 96485}\right)$$

$$E \cong 1,209V \quad (39)$$

Para 384 células conectadas em série:

$$E_{384} = 1,209 \times 384$$

$$E_{384} \cong 464,20V \quad (40)$$

Para o cálculo do rendimento, retornamos a Equação (28)

$$\begin{aligned} \eta_{m\acute{a}x} &= \frac{\Delta G_{1273}}{\Delta H_{1273}} \times 100 \\ \eta_{m\acute{a}x} &= -\frac{233272,35635}{-285453} \times 100 \\ \eta_{m\acute{a}x} &= 81,72\% \end{aligned} \quad (41)$$

De acordo com [12], a eficiência de uma CaC pode ser expressa em termos da relação entre tensão de operação e da tensão ideal da célula. A tensão atual é menor que a ideal devido as perdas associadas a polarização e perdas ôhmicas como já foi comentado. A eficiência térmica da célula pode ser escrita em termos da tensão atual da célula.

$$\eta_e = \frac{\text{Energia de saída utilizável}}{\Delta H}$$

$$\eta_e = \frac{V_{cel} \cdot I}{\left(\frac{\Delta G}{0,8172}\right)}$$

Uma vez que a ΔG representa a potência ideal da célula, podemos substituir pelo produto de uma tensão ideal V_{ideal} pela corrente da célula, logo:

$$\eta_e = \frac{V_{cel} \cdot I}{\left(\frac{V_{ideal} \cdot I}{0,8172}\right)}$$

$$\eta_e = \frac{V_{cel} \cdot 0,8172}{V_{ideal}} \quad (42)$$

O valor obtido em (39) se resume à tensão ideal na célula, calculado levando apenas em consideração a variação da energia livre de Gibbs, logo:

$$\eta_e = \frac{V_{cel} \cdot 0,8172}{1,209}$$

$$\eta_e = 0,676.V_{cel} \quad (43)$$

A CaC pode ser operada em diferentes correntes, entretanto, a tensão correspondente à corrente determinará a eficiência da célula. Diminuindo a corrente, aumentamos a tensão na célula aumentando o rendimento. Levando em consideração a relação entre potência, corrente e tensão, a queda na corrente necessitaria de maior tensão para suprir a carga, tensão essa que seria obtida aumentando a área ativa da célula, de forma a se obter a potência necessária.

5 Unidade de conversão de energia

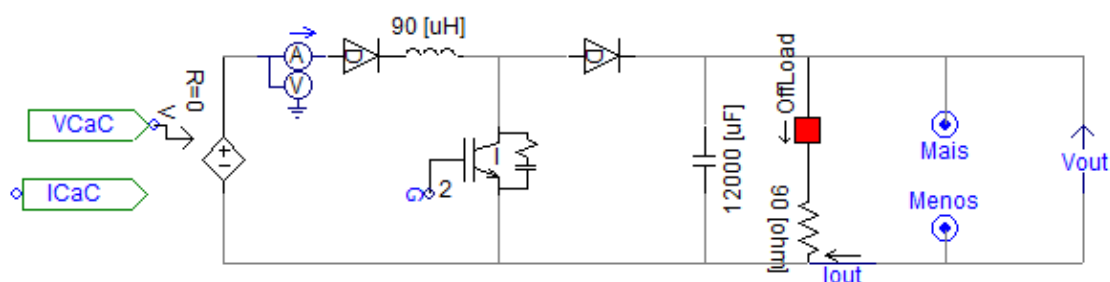
A SOFC em análise possui tensão V_{fc} de saída CC não regulada, ou seja, a tensão cai conforme há aumento de demanda. Para sua conexão com a rede é necessária sua conversão para valores mais altos, além do uso de um inversor para alternar a tensão na frequência desejada.

5.1 Conversor CC-CC

Tem por finalidade alterar e regular a tensão de saída para outro nível também CC, podem tanto aumentar como diminuir a tensão. A saída da célula em circuito aberto gira em torno dos 450V, e a plena carga 319V, o que impossibilita a interconexão com a rede.

Utilizaremos então, um conversor CC-CC *boost*, que aumentará o nível de tensão de maneira a possibilitar a conexão com a rede mesmo com as perdas que tendem a diminuir a tensão. Dessa forma, a tensão de saída do conversor CC-CC *boost* será regulada para 600V. A Figura 11 ilustra o conversor.

Figura 11: Conversor DC-DC *boost* com diodo anti-retorno.



Fonte: Próprio autor.

Um diodo anti-retorno foi adicionado para evitar correntes de retorno para a célula a combustível, além de uma resistência muito baixa de 90Ω , para a partida do conversor, representando 1% da potência gerada pela CaC.

O dimensionamento do conversor leva em conta os seguintes fatores:

Tensões de entrada e saída

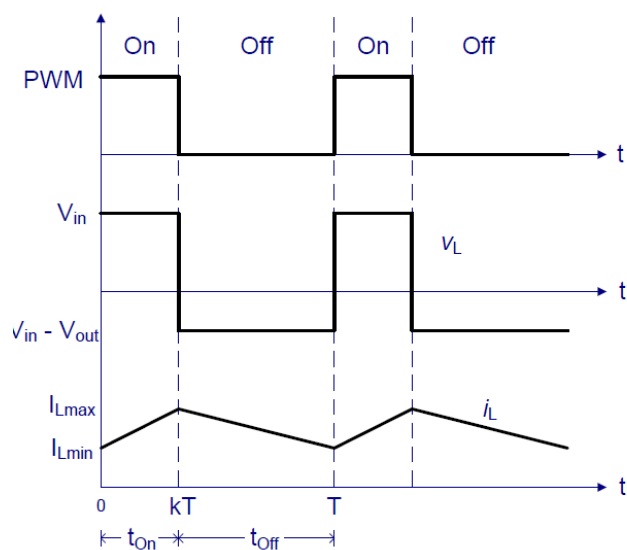
Frequência de chaveamento

Potência nominal

Ondulação de corrente

Modo de contínuo de condução de corrente (Figura 12)

Figura 12: Modo contínuo de condução de corrente.



Fonte: [13]

De acordo com [14], as razões cíclicas mínima e máxima do conversor podem ser calculadas por:

$$D_{min} = 1 - \frac{V_{fcAberto}}{V_{out}}$$

$$D_{min} = 1 - \frac{453}{600} = 0,2450 \quad (44)$$

$$D_{max} = 1 - \frac{V_{fcPlenaCarga}}{V_{out}}$$

$$D_{max} = 1 - \frac{319}{600} = 0,4683 \quad (45)$$

Dimensionamento do capacitor e indutor do conversor CC-CC *boost* é dado pelas seguintes expressões:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_c} \quad (46)$$

$$L = \frac{V_{fc} \cdot D}{f \cdot \Delta I} \quad (47)$$

Onde:

D – Razão cíclica

f – Frequência de chaveamento

V_{fc} – Tensão de saída da célula a combustível

I_o – Corrente de plena carga na saída do conversor

ΔI – Ondulação de corrente no indutor

ΔV_c – *Ripple* na tensão de saída do conversor

Agora podemos dimensionar os demais componentes de maneira a operar no modo contínuo de condução. A Tabela 4 mostra os valores das grandezas citadas.

Tabela 4: Parâmetros para o dimensionamento do conversor CC-CC *boost*.

Grandeza	Valor
F	20 kHz
$V_{fca\ aberto}$	453 V
$V_{fca\ plena\ carga}$	219 V
V_{out}	600 V
I_o	666,6667 A
ΔI	20% I_o =133,3333 A
ΔV_c	$\pm 5\%V_{out} = \pm 30$ V

Fonte: Próprio autor.

Calculando o capacitor de (46) e o indutor de (47) para D_{min} :

$$C_{min} = \frac{I_o \cdot D_{min}}{f \cdot \Delta V_c}$$

$$C_{\min} = \frac{666,6667.0,2450}{20 \times 10^3 \cdot 30}$$

$$C_{\min} = 272,2223 \mu F \quad (48)$$

$$L_{\min} = \frac{V_{fc} \cdot D_{\min}}{f \cdot \Delta I}$$

$$L_{\min} = \frac{453.0,2450}{20 \times 10^3 \cdot 133,3333}$$

$$L_{\min} = 41,6194 \mu H \quad (49)$$

Para D_{\max} :

$$C_{\max} = \frac{I_o \cdot D_{\max}}{f \cdot \Delta V_c}$$

$$C_{\max} = \frac{666,6667.0,365}{20 \times 10^3 \cdot 30}$$

$$C_{\max} = 405,555 \mu F \quad (50)$$

$$L_{\max} = \frac{V_{fc} \cdot D_{\max}}{f \cdot \Delta I}$$

$$L_{\max} = \frac{453.0,365}{20 \times 10^3 \cdot 133,3333}$$

$$L_{\max} = 62,004 \mu H \quad (51)$$

A Tabela 5 mostra os valores calculados para as razões cíclicas.

Tabela 5: Valores de capacitância e indutância para D_{\min} e D_{\max} .

Razão cíclica (D)	Grandeza	Valores
D_{\min}	L_{\min}	41,6194 μH
	C_{\min}	272,2223 μF
D_{\max}	L_{\max}	62,004 μH
	C_{\max}	405,555 μF

Fonte: Próprio autor.

Para garantir o modo de operação contínuo devemos escolher valores que garantam modo de operação contínuo em todas as razões cíclicas possíveis, logo adotaremos $C > 405,555 \mu F$ e $L > 62,004 \mu H$.

Por tentativa e erro em simulações, resultados satisfatórios foram obtidos para $C = 12000 \mu F$ e $L = 90 \mu H$.

Com os valores de capacitor e indutor a serem usados já definidos, recalculamos os dados da Tabela 3, de modo a obter a Tabela 6, com os resultados finais do projeto do conversor.

Tabela 6: Resultados finais do conversor CC/CC.

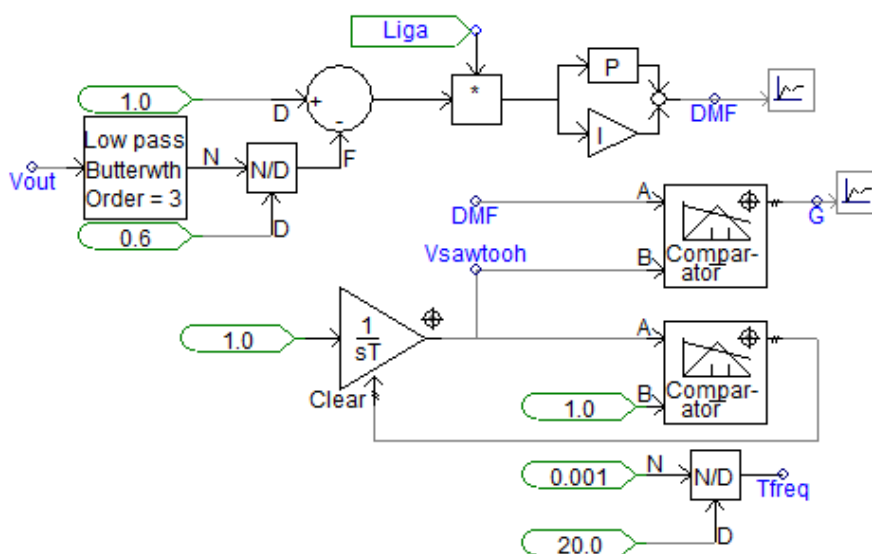
Grandeza	Valor
f	20kHz
$V_{fc \text{ aberto}}$	453V
$V_{fc \text{ plena carga}}$	319V
I_0	666,6667 A
ΔI_{min}	9,2487% I_0
ΔI_{max}	12,4490% I_0
$\Delta V_{c \text{ mín}}$	0,1134% V_{out}
$\Delta V_{c \text{ max}}$	0,2168% V_{out}

Fonte: Próprio autor.

5.1.1 Controle do conversor *boost*

A tensão de saída tem que se manter fixa em 600V, a Figura 13 ilustra o controlador.

Figura 13: Representação do controlador do conversor CC-CC no software PSCAD.



Fonte: Próprio autor.

O botão de liga conectado ao multiplicador tem por função não iniciar a operação de conversão no instante em que a célula entra em operação, para evitar espúrios que venham a interferir no controle posteriormente. O mesmo dispositivo é utilizado no inversor CA-CA.

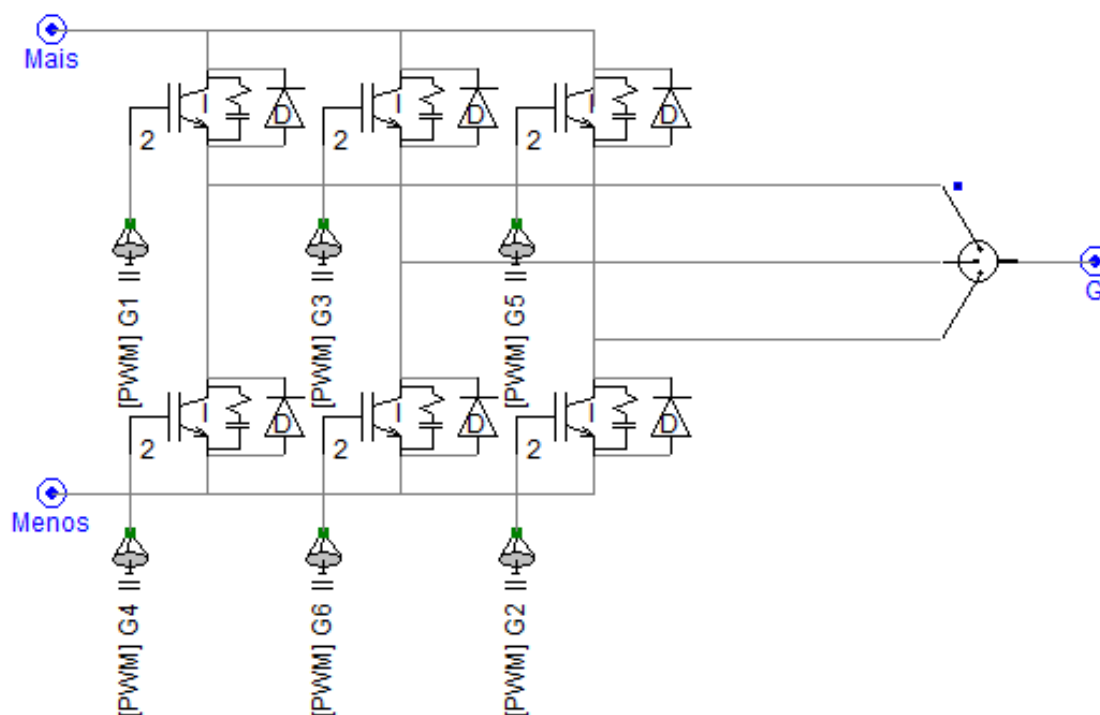
Inicialmente a tensão de saída do conversor é convertida para pu (base 0.6) em seguida subtrai-se da tensão de 600V desejada, essa diferença passa por um controlador proporcional-integral (PI) originando um novo sinal chamado de Disparo em Malha Fechada (DMF).

Uma onda dente de serra criada a partir de um integrador é comparada com o sinal DMF, toda vez DMF for maior que a onda, a saída é posta em 1. Nos outros casos assume o valor 0.

5.2 Inversor VSI

O conversor CC-CA consiste em um inversor fonte de tensão, ou VSI (*voltage source inverter*). A Figura 14 ilustra o inversor modelado no PSCAD:

Figura 14: Inversor VSI modelado no software PSCAD.



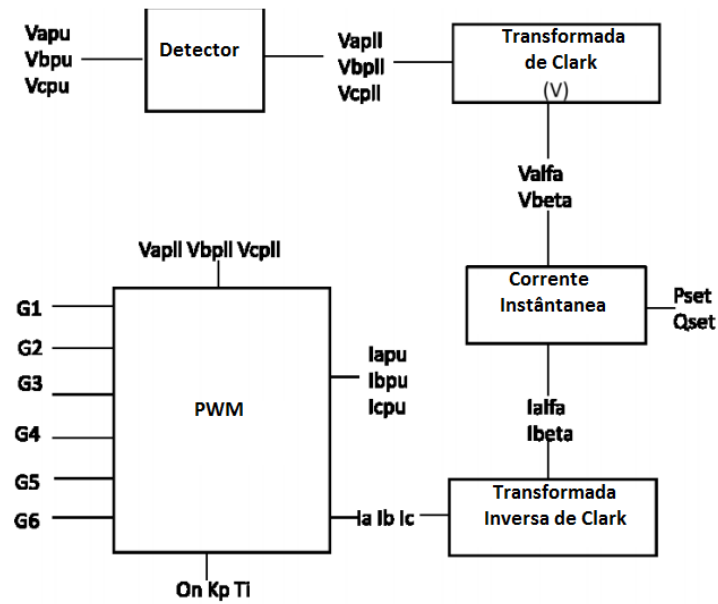
Fonte: Próprio autor.

Tomando com pares os transistores G1 e G4, G3 e G6, G5 e G2, o funcionamento do inversor acontece de forma que cada par tenha apenas um transistor conduzindo por vez. O controle de acionamento será realizado pelo controle PQ.

5.2.1 Controle PQ

A Figura 15 a seguir ilustra o diagrama de obtenção dos sinais para o PWM controlar os transistores G1 a G6.

Figura 15: Diagrama de obtenção dos sinais para o PWM.



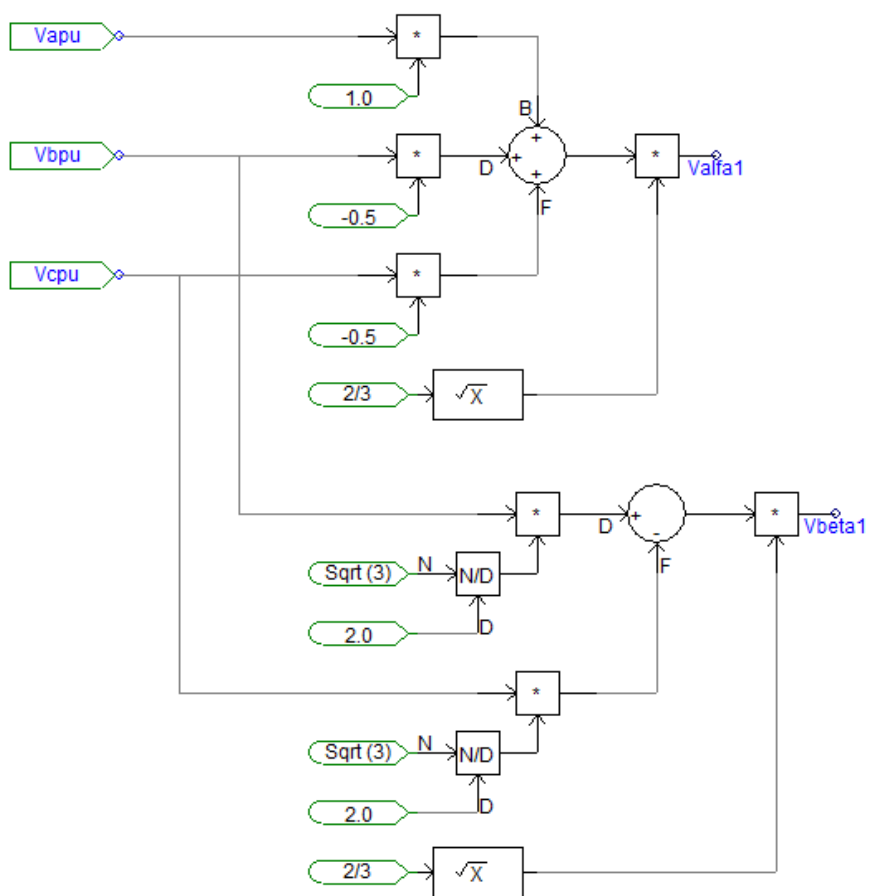
Fonte: Próprio autor.

Inicialmente o bloco Detector capta a sequência positiva das tensões. Inicialmente a transformada de Clark (52) de acordo com [16] é aplicada, resultando em V_{alfa1} e V_{beta1} .

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{Transformada de Clark} \quad (52)$$

O equivalente a Equação (52) no PSCAD se encontra na Figura 16.

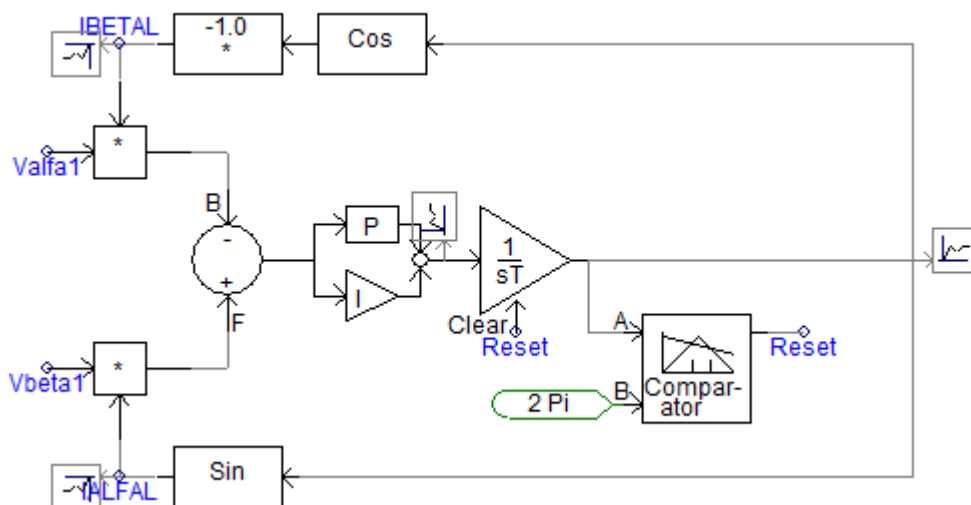
Figura 16: Transformada de Clark para o Detector de sequência positiva.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida, ainda no mesmo bloco, obtemos os valores de $I_{\alpha L}$ e $I_{\beta L}$ como mostra a Figura 17.

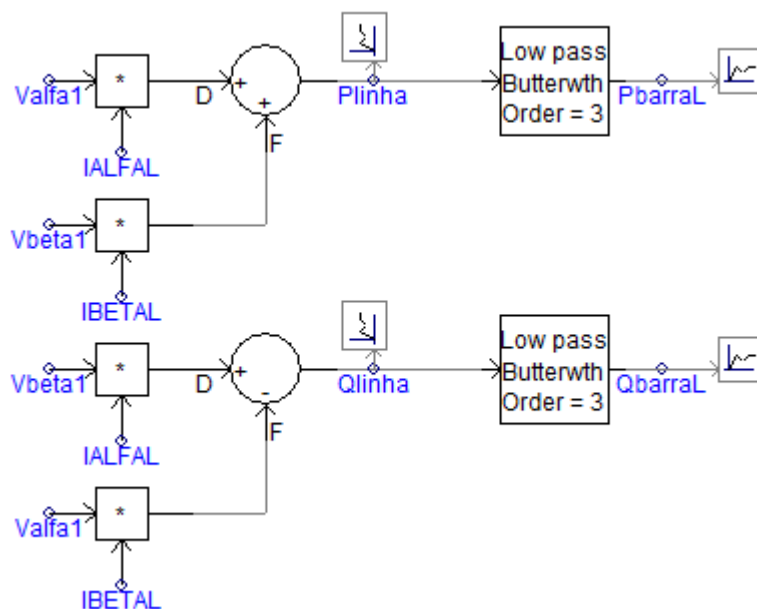
Figura 17: Obtenção dos valores de $I_{\alpha L}$ e $I_{\beta L}$ do detector de sequência positiva.



Fonte: Próprio autor.

Ainda de acordo com [16], e a partir dos valores de $V_{\alpha 1}$, $V_{\beta 1}$, $I_{\alpha L}$ e $I_{\beta L}$, obtemos os valores das potências ativa e reativa como ilustrado na Figura 18:

Figura 18: Obtenção das potências ativas e reativas.

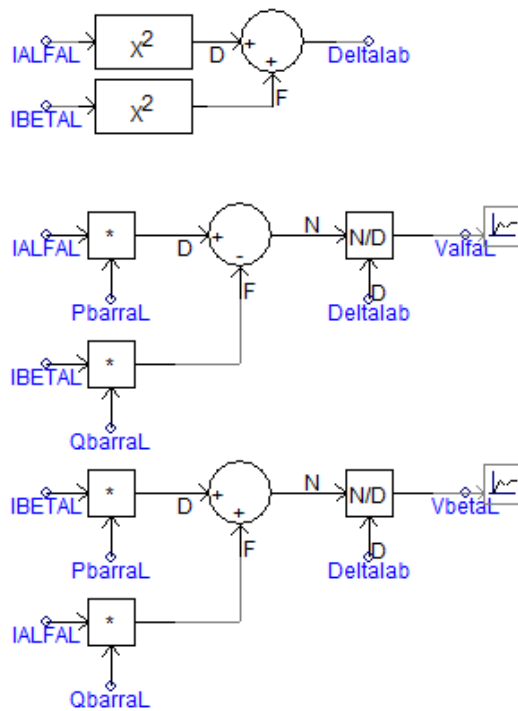


Fonte: Próprio autor.

Em seguida, na Figura 19, obtemos os valores instantâneo das tensões nos eixos alfa e beta [16], a variável Deltalab tem apenas a função de simplificar o diagrama de blocos:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}$$

Figura 19: Obtenção dos valores instantâneos de tensão nos eixos alfa e beta.



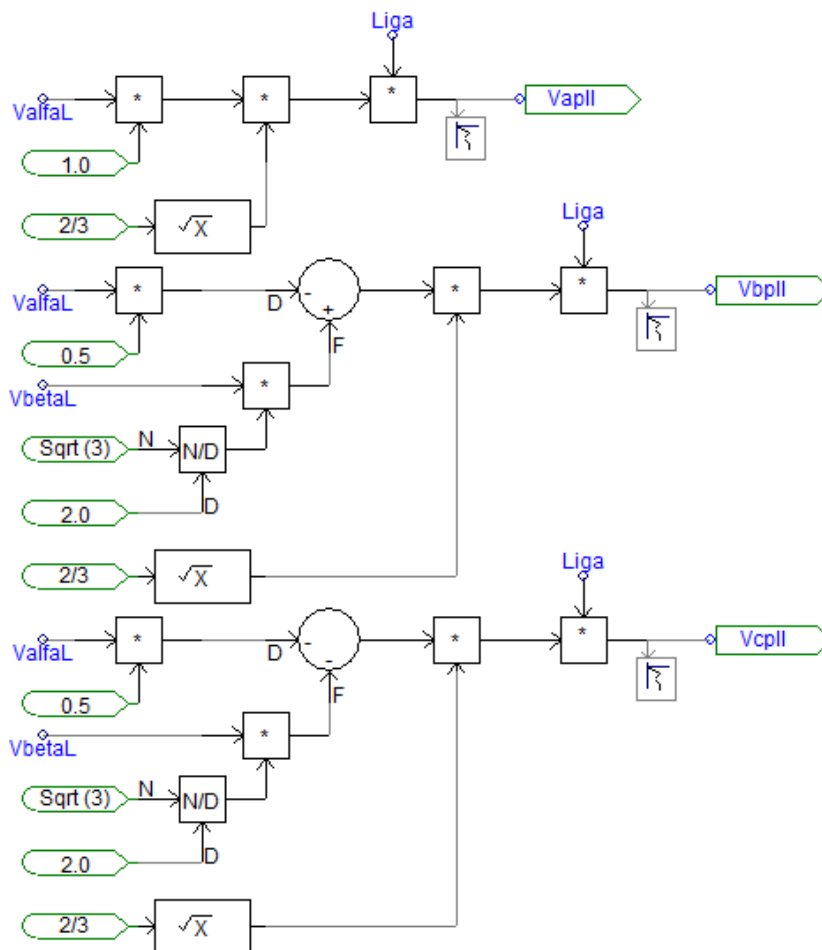
Fonte: Próprio autor.

Finalmente, aplicamos a transformada inversa de Clarke (53), de modo a obtermos os valores de tensão de sequência positiva.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad \text{Transformada Inversa de Clark} \quad (53)$$

A Figura 20 ilustra a Equação (53).

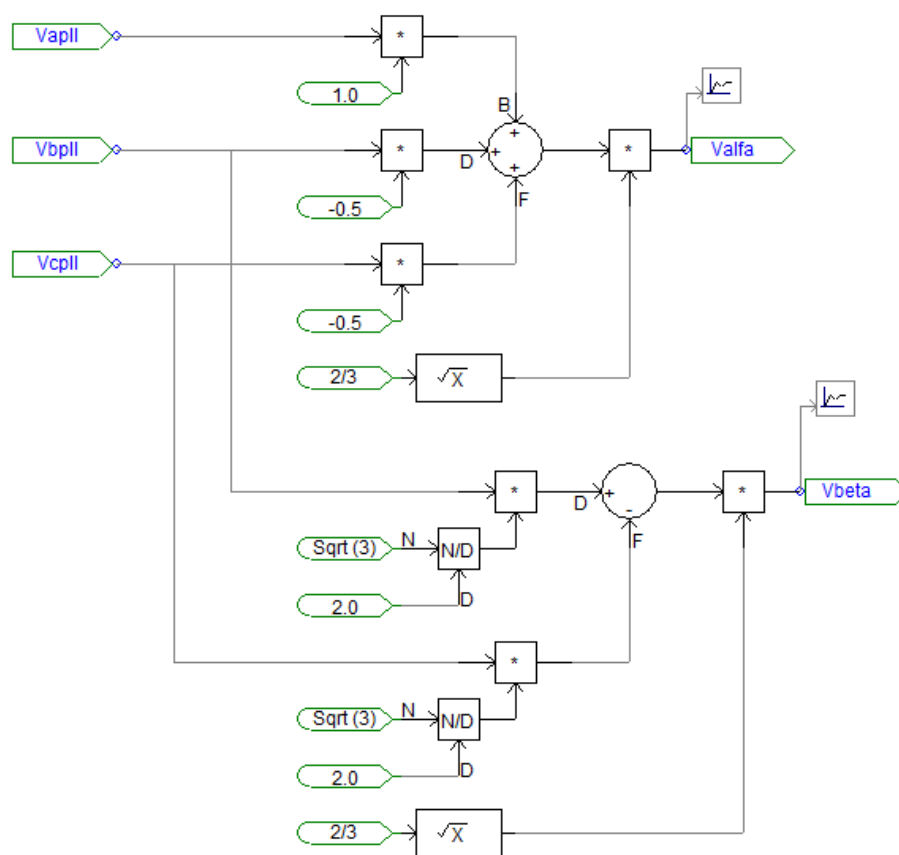
Figura 20: Transformada Inversa de Clark do Detector de sequência positiva.



Fonte: Próprio autor.

Com os valores de tensão de sequência positiva V_{apll} , V_{bppl} e V_{cppl} partimos para o próximo bloco, ilustrado pela Figura 21, onde a transformada de Clarke é aplicada novamente, obtendo os valores instantâneos de tensão nos eixos alfa e beta.

Figura 21: Transformada de Clarke para os valores instantâneos de tensão nos eixos alfa e beta.



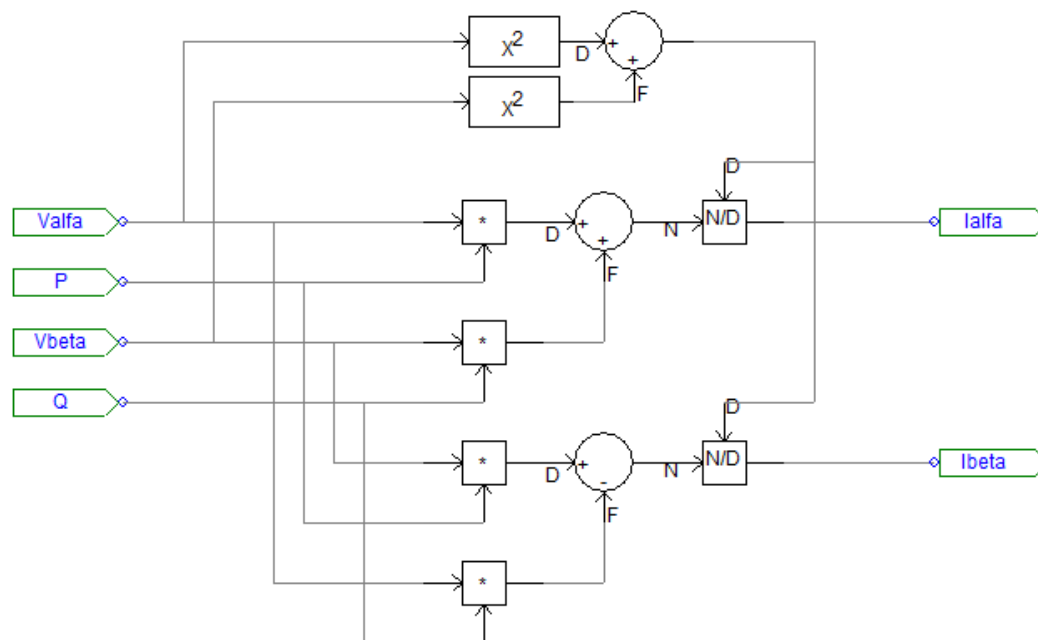
Fonte: Próprio autor.

O bloco seguinte calcula as correntes instantâneas nos eixos alfa e beta de acordo com a Equação (54):

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (54)$$

A Figura 22 ilustra a Equação (54) no PSCAD.

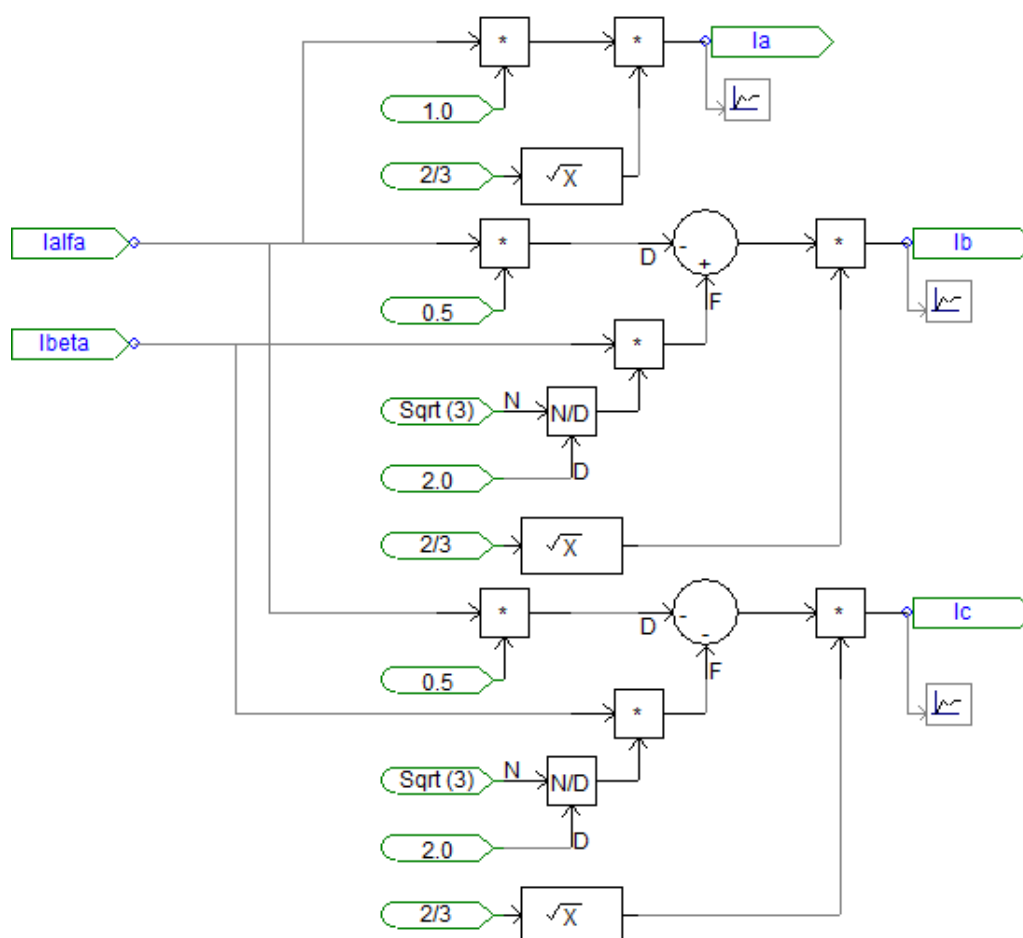
Figura 22: Correntes instantâneas nos eixos alfa e beta.



Fonte: Próprio autor.

Finalmente, na Figura 23, a transformada inversa de Clarke é aplicada, de modo a obter os valores instantâneos de corrente i_a , i_b e i_c .

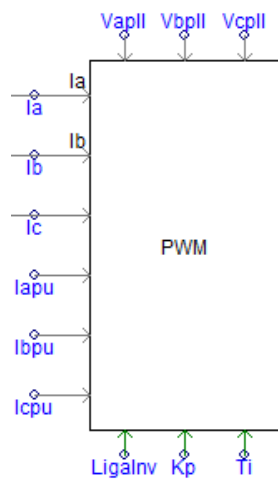
Figura 23: Transformada inversa de Clark para obtenção das correntes instantâneas.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, na Figura 24, o PWM agora possui todos os sinais de entrada para efetuar o controle do inversor.

Figura 24: PWM.

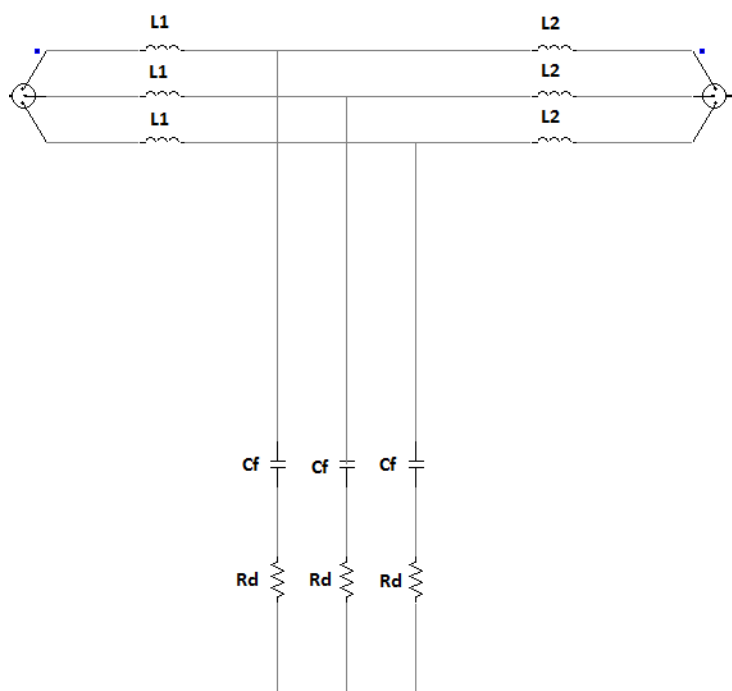


Fonte: Próprio autor.

5.3 FILTRO LCL

A Figura 25 mostra o filtro LCL modelado no PSCAD. Sua metodologia foi seguida com base em [17] e [18]:

Figura 25: Filtro LCL modelado no PSCAD.



Fonte: Próprio autor.

A determinação dos parâmetros do filtro está em função da potência do conversor (P), da tensão nominal eficaz do filtro (V_e), da frequência da rede (f) e da frequência de chaveamento do conversor (f). Os valores utilizados constam na Tabela 7:

Tabela 7: Parâmetros para determinação do filtro.

P_n	400W
V_e	220V
f_{rede}	60Hz
f_s	10kHz

Fonte: Próprio autor.

Os valores do filtro serão normalizados em relação aos valores base conforme (55) e (56):

$$Z_b = \frac{V_e^2}{P_n} \quad (55)$$

$$Z_b = 0,121\text{pu}$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_b \cdot Z_b} \quad (56)$$

$$C_b = 0,022\text{pu}$$

O indutor será função da corrente de *ripple* máxima admissível (i_{ripple}). Essa corrente é 3,5% maior que a corrente de pico (i_{pico}). As Equações (57) e (58) calculam (i_{pico}) e L_1 respectivamente.

$$i_{ripple} = 0,035 \cdot i_{pico} = 0,035 \cdot \frac{P_n}{\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_e} \quad (57)$$

$$i_{ripple} = 51,95887\text{A}$$

$$L_1 = \frac{Ve}{2\sqrt{6}.f_s.i_{ripple}} \quad (58)$$

$$L_1 = 86.4\mu\text{H}$$

Os valores dos indutores L_2 e L_1 se relacionam por meio do parâmetro r , estimado pela equação de atenuação de corrente. O valor escolhido para atenuação, por questões práticas, é de 20%, o que leva a um valor de $r = 0,22$. A Equação (57) calcula L_2 . O capacitor tem seu valor limitado pela potência reativa que circula no sistema, através do parâmetro $x = 5\%$, e pode ser calculado conforme a Equação (58)

$$L_2 = 0,22.L_1 \quad (59)$$

$$L_2 = 19\mu\text{H}$$

$$C_f = x \cdot \frac{P_n}{\omega_n.e^2} \quad (60)$$

$$C_f = 1,1\text{mF}$$

Para evitar fatores de potência baixos, a potência reativa oriunda de C_f deve ser menor ou igual a 15% da capacitância base C_b . A condição é satisfeita, como mostra a equação (61):

$$C_f \leq 15\%C_b \quad (61)$$

$$1,1\text{mF} \leq 3,29\text{mF}$$

A frequência de ressonância (f_{res}) deve estar entre dez vezes à frequência da rede (f_n) e a metade da frequência de chaveamento (f_s) afim de não criar problemas de ressonância. Então, $10.f_n < f_{res} < 1/2.f_s$ (63). A frequência de ressonância (62) é calculada como:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_1 + L_f}{L_1 \cdot L_f \cdot C_f}} \quad (62)$$

$$f_{res} = 1217,7\text{Hz}$$

$$10f_{rede} < f_{res} < f_s/2 \quad (63)$$

$$600\text{Hz} < 1217,7\text{Hz} < 5\text{kHz}$$

Logo, o intervalo de frequência foi respeitado. O resistor R_d deve ser otimizado levando em consideração a resposta dinâmica do filtro, a frequência de ressonância e as perdas em baixa frequência. O valor inicial de R_d (R_{d0}) é definido como o dobro da impedância do capacitor na frequência de ressonância (64).

$$R_{d0} = 2 \cdot \frac{1}{\omega_{res} \cdot C_f} \quad (64)$$

O valor adotado de R_d foi 5 vezes maior que R_{d0} :

$$R_d = 5 \cdot R_{d0} = 1,19\Omega$$

Dessa forma, calculamos todos os parâmetros do filtro LCL, estes são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros do filtro LCL.

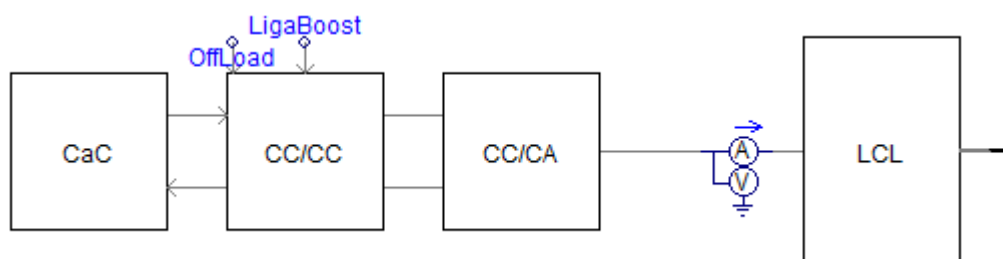
$L_1(\mu\text{H})$	$L_2(\mu\text{H})$	$C_f(\text{mF})$	$R_d(\Omega)$
86,4	19	1,1	1,19

Fonte: Próprio autor.

6 Análise por Simulação e Resultados

Nessa parte mostraremos os resultados obtidos no PSCAD para o sistema mostrado na Figura 23:

Figura 26: Guia das simulações.

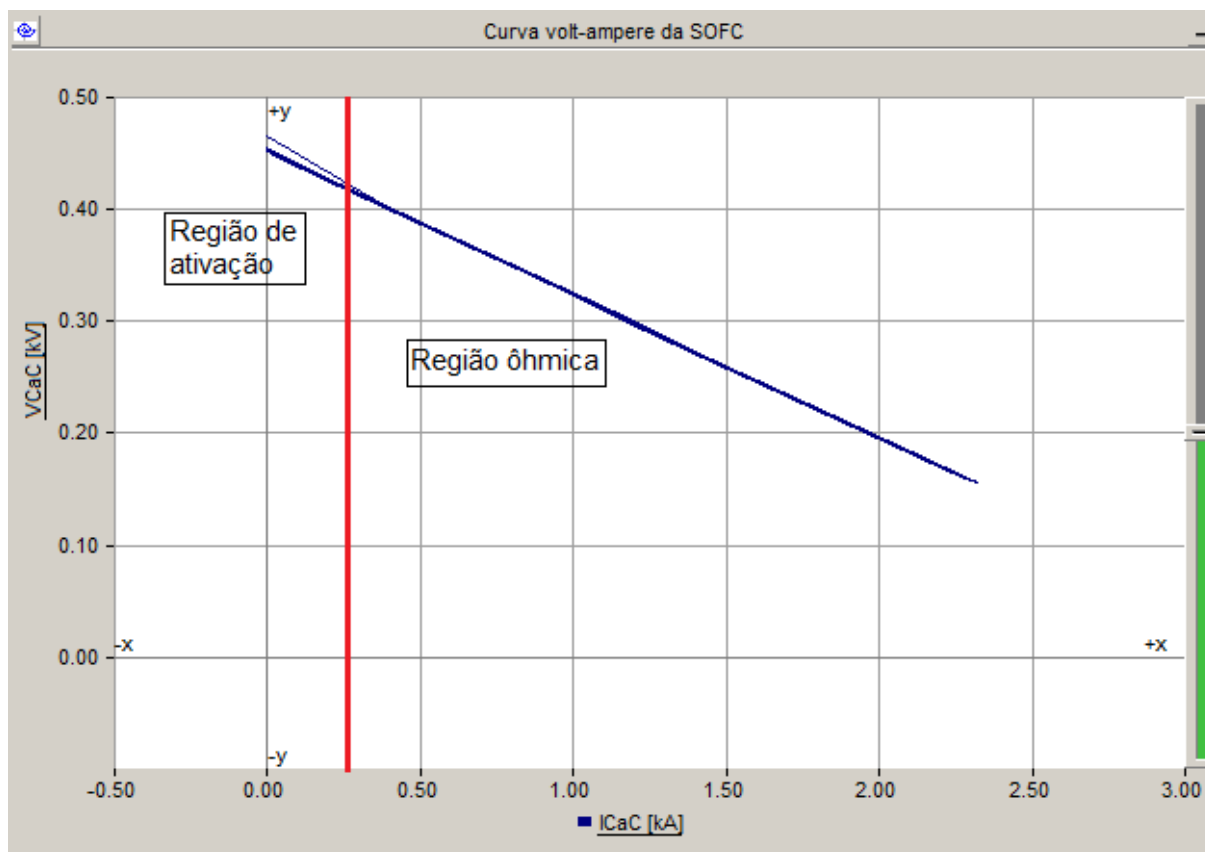


Fonte: Próprio autor.

Todas as simulações terão os dois segundos iniciais destinados a ligar o *boost* e o inversor, sendo que com um segundo de simulação o *boost* é ligado e com dois segundos o inversor, a carga inicial será de 50 kW. Por testes via simulação nota-se instabilidade quando a célula começa o funcionamento com o *boost* e o inversor já ligados.

A Figura 5 ilustra o comportamento teórico da CaC, o local onde se tem comportamento linear entre tensão e corrente também chamado de região de polarização ôhmica, é a região de operação da célula. A simulação resultou no gráfico da Figura 26:

Figura 27: Curva volt-ampere da SOFC.

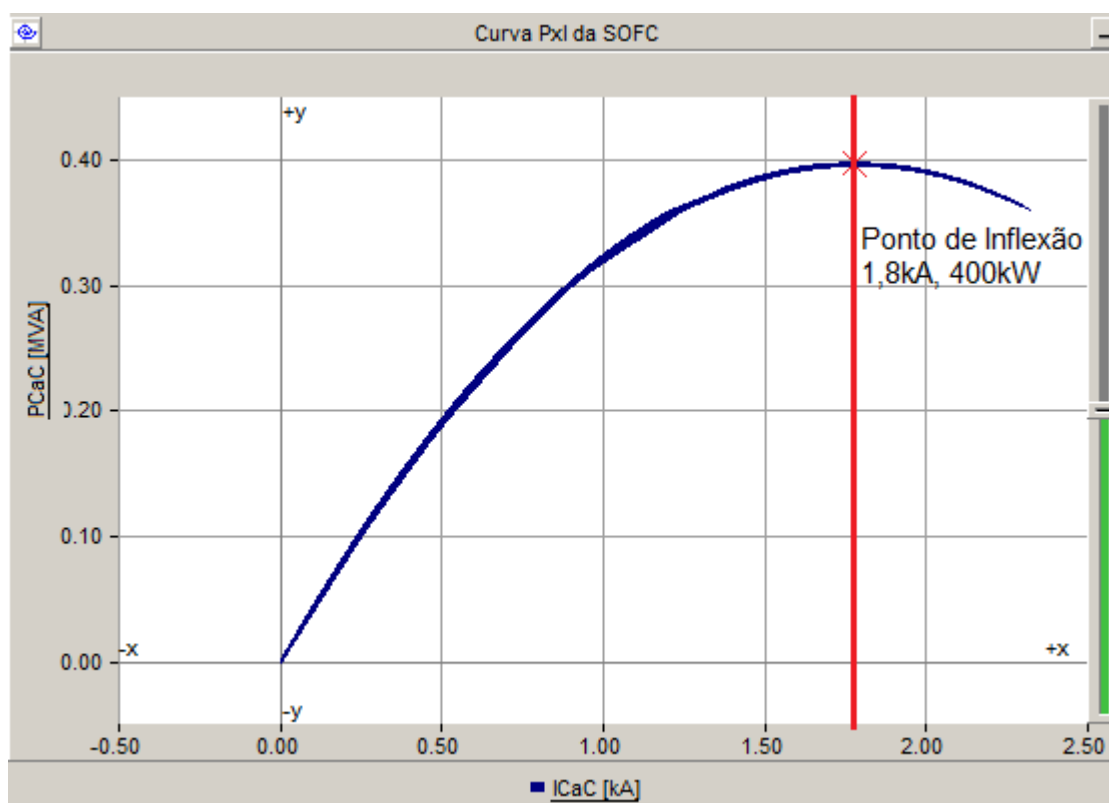


Fonte: Próprio autor.

A linha em vermelho na Figura 24 ilustra a divisão entre as regiões ôhmicas e de ativação. As áreas onde há perdas de ativação e concentração são muito sutis na simulação, podendo até ser descartadas por simplicidade [6].

Potência e corrente variam de forma linear, à medida que a demanda aumenta, a corrente também aumenta, entretanto, há um limite, um ponto de inflexão na curva P_{xl} da SOFC, a partir de onde o comportamento não é mais linear, o aumento de corrente a partir daquele ponto não será acompanhado por aumento da potência, como mostra a Figura 27:

Figura 28: Curva Pxl da SOFC.



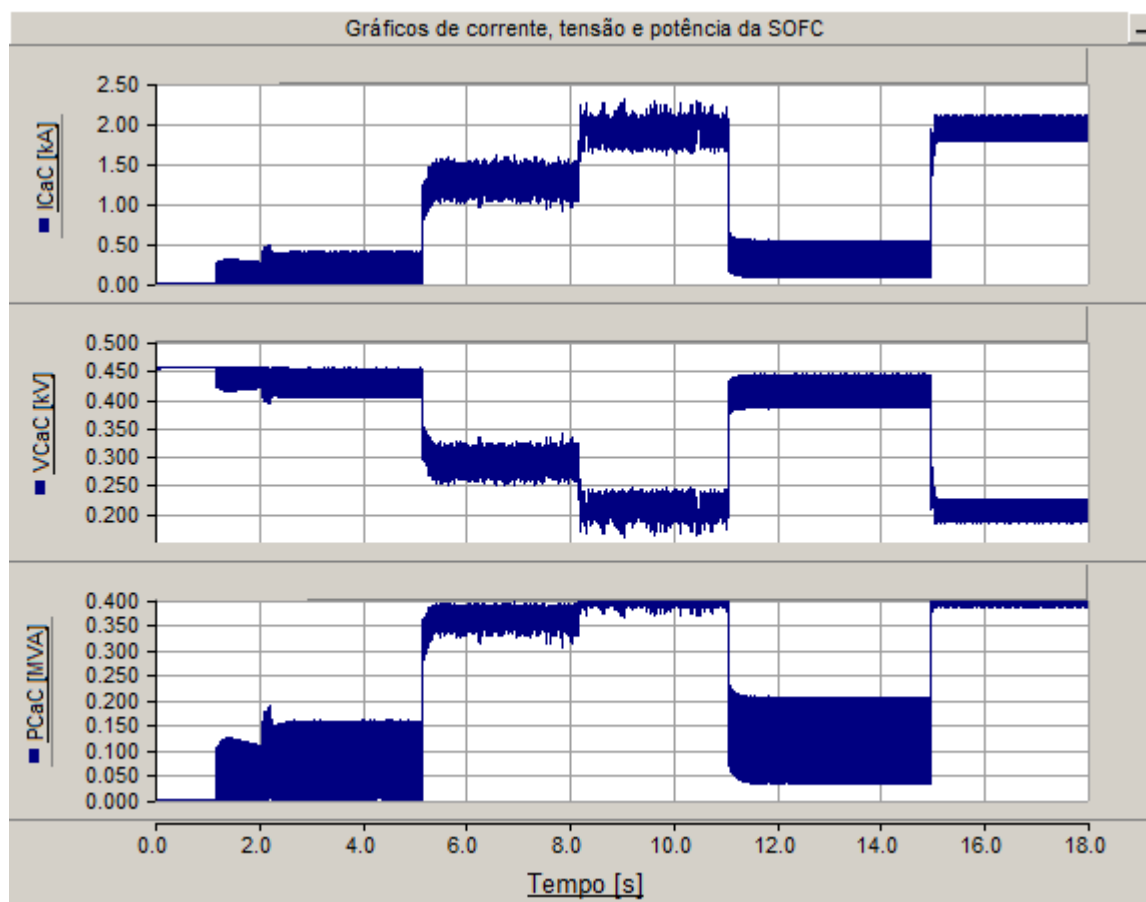
Fonte: Próprio autor.

A partir do ponto de inflexão a SOFC se torna instável, tendo então sua região de operação limitada a área demarcada pela corrente de 1,8kA.

A SOFC foi submetida a variações de carga para observar seu comportamento.

As variações de carga seguiram como ilustra a Figura 28, lembrando que o *boost* e o inversor só entraram em ação depois dos 2 segundos de simulação.

Figura 29: Corrente, tensão e potência da SOFC.

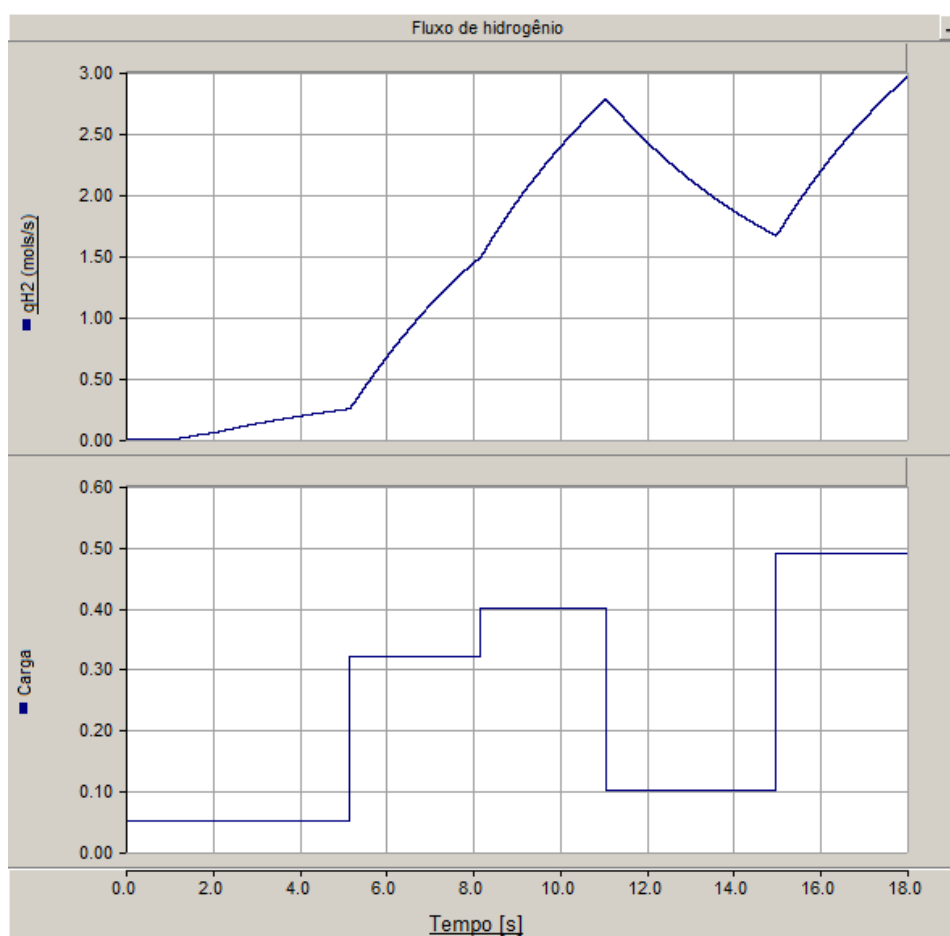


Fonte: Próprio autor.

A Figura 28 deixa claro o comportamento proporcional entre corrente e potência, bem como o comportamento espelhado entre tensão e corrente, como esperado visto Figura 26 e Figura 27.

A Figura 29 ilustra as mudanças no fluxo de hidrogênio mediante as mesmas variações de carga da Figura 28. O gráfico da Carga, ilustra as mudanças na demanda ao decorrer do tempo.

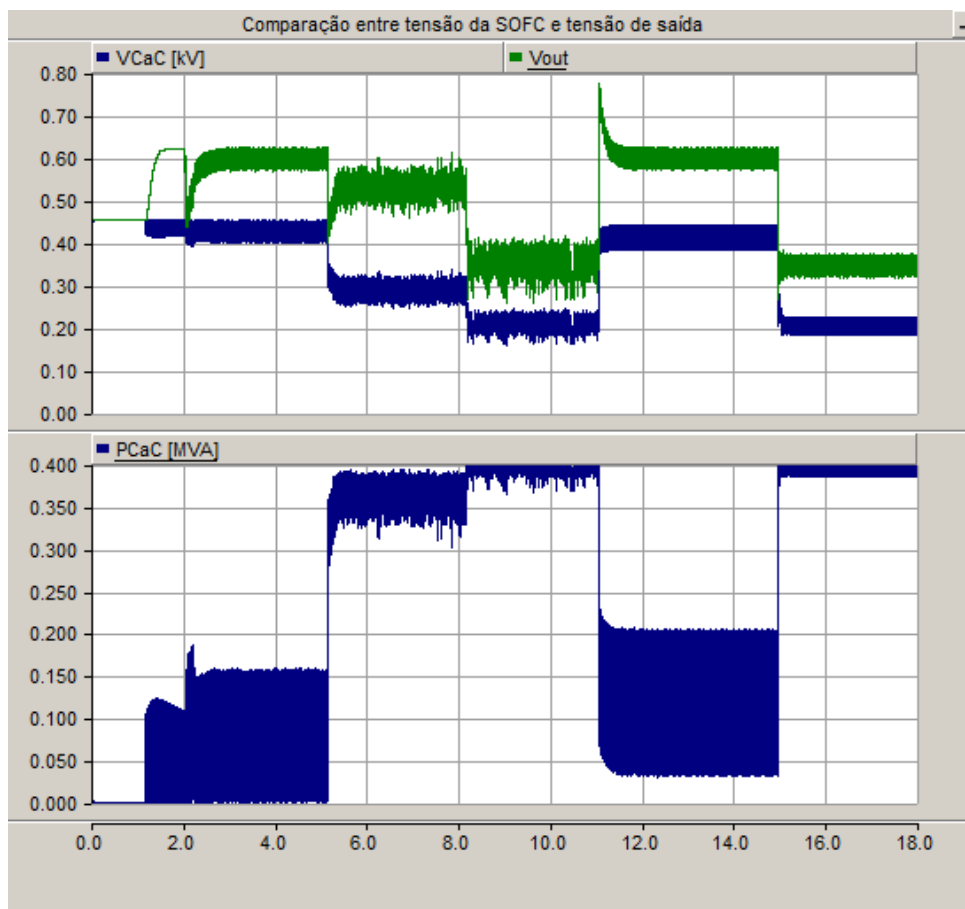
Figura 30: Fluxo de hidrogênio mediante variações de carga.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 29 a seguir ilustra o funcionamento do *boost*: onde a tensão da SOFC é aumentada para 600V, com o aumento da potência, há um aumento na corrente aumentando as perdas ôhmicas, ocasionando queda na tensão.

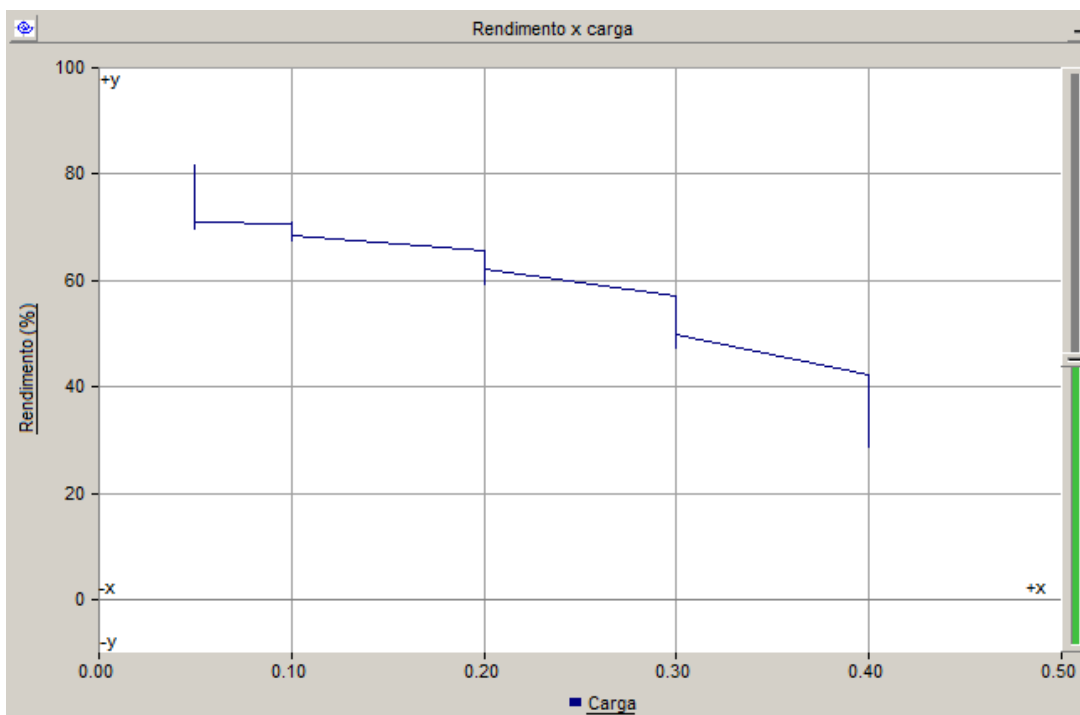
Figura 31: Comparação entre a tensão da SOFC e tensão de saída.



Fonte: Próprio autor.

Dessa maneira, há de se esperar uma queda no rendimento com o aumento da carga. Na Figura 30 nota-se o aumento da carga acompanhada pela queda do rendimento. Nesse gráfico a mudança na carga foi sempre crescente, com intuito de mostrar a suave queda contínua do rendimento. A Figura 31 ilustra a variação de carga utilizada na Figura 30.

Figura 32: Rendimento x Carga da SOFC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 33: Variação de carga utilizada para análise do rendimento.



Fonte: Próprio autor.

7 Conclusão

O aumento do consumo de energia associado à limitada disponibilidade de combustíveis fósseis impulsiona o estudo de novas fontes de energia capazes de se interligarem com a atual rede caracterizando a Geração Distribuída (GD). Os benefícios incluem melhor qualidade de energia, uso de fontes renováveis de energia e diminuição de perdas em transmissão, devido à proximidade das fontes de geração com as cargas.

Este projeto teve como objetivo implementar uma SOFC bem como seus dispositivos de conversão no *software* PSCAD, para a simulação de sua conexão com a rede. A tensão de saída é baixa, aproximadamente 1V, sendo necessário então o uso de células conectadas em série para aumentar a tensão de saída da SOFC. Em seguida é conectado um conversor *boost* de modo a elevar e regular a tensão. Logo após, o inversor com controle *PQ* é acoplado. Por trabalhar com valores instantâneos de potência, se torna muito eficiente para análises em regimes transitórios e estacionário, além de se valer apenas de operações algébricas. Por fim um filtro LCL é incluído de modo a minimizar harmônicos, principalmente oriundos do chaveamento no PWM.

As simulações no Capítulo 6 mostraram que unidades de geração de energia feitas a partir de células a combustível podem ser conectadas à rede como fonte de geração de energia em sistemas de Geração Distribuída.

Vale lembrar que este trabalho considerou o constante fornecimento de combustível. Em casos onde se faça uso de reformadores, dispositivos com o objetivo de extrair o hidrogênio de hidrocarbonetos ou álcoois, há a possibilidade de alimentação contínua da célula por meio de encanamentos. Já a alimentação direta com hidrogênio seria feita através de tanques, visto os riscos que tal combustível em sua forma pura ofereceria caso encanado.

Apêndice

A.1 - Parâmetros para o modelo da SOFC [9].

	Representação	Valor
T	Temperatura absoluta	1273
F	Constante de faraday	96487 C/mol
R	Constante universal dos gases	8314 J/(kmol K)
E°	Potencial de padrão da célula	1.18 V
N	Número de células	384
K_R	Constante, $K_r = N/4F$	0996×10^{-6} kmol/(s A)
U_{máx}	Uso máximo de combustível	0.9
U_{mín}	Uso mínimo de combustível	0.8
U_{opt}	Uso ótimo de combustível	0.85
K_{H₂}	Constante molar de fluxo de hidrogênio	8.43×10^{-4} kmol/(s atm)
K_{O₂}	Constante molar de fluxo de oxigênio	2.81×10^{-4} kmol/(s atm)
K_{H₂O}	Constante molar de fluxo de água	2.52×10^{-4} kmol/(s atm)
τ_{H₂}	Tempo de resposta para ao fluxo de hidrogênio	26.1 s
τ_{H₂O}	Tempo de resposta para o fluxo de água	78.3 s
τ_{O₂}	Tempo de resposta para o fluxo de oxigênio	2.91 s
T_e	Tempo de resposta elétrica	0.8 s
T_f	Tempo de resposta do processador de combustível	5 s
r_{HO}	Razão de hidrogênio para o oxigênio	1.145

A.2 – Parâmetros para o cálculo das perdas de ativação e concentração [9],
[10].

	Representação	Valor
R	Constante Universal dos Gases	8314 J/(kmol K)
T	Temperatura	1273 K
α	Coeficiente de transferência de carregamento	0.2
n	Número de elétrons envolvidos	2
F	Constante de Faraday	96487 (C/mol)
i	Corrente da CaC	
i_o	Corrente de troca	0.004 (A)
R_c	Resistência da célula	126 (Ω)
i_{Δ}	Corrente limite	1.2 (A)

Bibliografia

- [1] Ned Mohan, T. M. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed.* USA: John Wiley & Sons.
- [2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional. 2014
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 482. 2012.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Cadernos temáticos Aneel: Micro e Minigeração distribuída. 2014.
- [5] MINAS GERAIS. Lei nº 20.824. 2013.
- [6] Nagasmitha Akkinapragada. Dynamic Modeling and Simulations of Solid Oxide Fuel Cells for Grid-Tied Applications, 2007
- [7] HVDC. Disponível em: <https://hvdc.ca/pscad/>. Acesso em 04 de out. 2015.
- [8] J. Wen, K. M. Smedley, and M. A. Pai, "Load-Following Improvement of Fuel Cells with Fast Transient OCC Inverter," Proc. IEEE/ASME, Intl. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 140-145, Julho 2005.
- [9] Y. Zhu, and K. Tomsovic, "Development of Models for Analyzing the Load-Following Performance of Micro Turbines and Fuel Cells," Electric Power Syst. Research, vol. 62, Issue 1, pp. 1-11, Maio 2002.
- [10] J. Larminie, and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [11] I. Pilatowsky, R.J. Romero, C.A. Isaza, S.A. Gamboa, P.J. Sebastian, W. Rivera, "Thermodynamics of Fuel Cells", Springer London, 2011.
- [12] Smith, Van Ness, Abbott, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 7th ed, Springer London, 2011.
- [13] Ptui-Weng Chan, Syafrudin Masri, "DC-DC Boost Converter with Constant Output Voltage for Grid Connected Photovoltaic Application System", Universiti Sains Malaysia.

- [14] T. M. Underland, WP Robbins, N Mohan “Power electronics: converters, applications, and design”, John Wiley & Sons, 2003.
- [15] Edson H. Watanabe, Hirofumi Akagi, Maurício Aredes “The P-Q theory for active filter control: Some problems and solutions”, COPPE/UFRJ, Federal University of Rio de Janeiro.
- [16] Edson H. Watanabe, Maurício Aredes “Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações – Filtros Ativos e FACTS”, COPPE/UFRJ.
- [17] Matos, F. F., Sousa, C. V., Rezende, G. M., Toledo, R. A. N., Seleme Jr., S. I., Silva, S. R. (2010). Projeto e Construção de Filtro LCL para Conversores PWM. Departamento de Engenharia Elétrica UFMG, XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Setembro 2010, Bonito-MS.
- [18] Sun, W., Chen, Z., Wu, X. (2009). Intelligent Optimize Design of LCL Filter for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier. Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09, IEEE 6th International.
- [19] Marvin Warshay e Paul R. Prokopius. The Fuel Cell in Space: Yesterday, Today and Tomorrow. NASA Technical Memorandum 102366. Cleveland, Ohio. Setembro de 1989.
- [20] U.S Department of Energy, “State of the States: Fuel Cells in America 2014”, 5th Edição, Dezembro de 2014.
- [21] Jaqueline Costa Marrero, "FILMES FINOS DE ZIRCÔNIA ESTABILIZADA COM ÍTRIO PARA APLICAÇÃO COMO ELETRÓLITO EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO". Rio de Janeiro, RJ. Julho de 2013.
- [22] Matheus Barbosa de Oliveira e Silva, “Sistema Isolado Baseado em Célula a Combustível Associado a um Controle Pelo Lado da Demanda”. UFES. Vitória, ES, 2015.
- [23] <http://www.allergy.com/fuel-cell-and-hydrogen-facts/>. Acesso em 01/12/2016.
- [24] Al-Ahmed, Safdar Hossain, Bello Mukhtar, S. U. Rahman, Habib Abualhamayel, Javaid Zaidi, “Hydrogen Highway: An Overview”. King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran-31261, Saudi Arabia.