



ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA BALANÇO DE PLANTA EM PILHA A
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM SINCRONISMO INTERNO NO
CONVERSOR DE POTÊNCIA

Sidney Odocio do Almo Torres

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Antônio Carneiro de Mesquita Filho
Paulo Emilio Valadão de Miranda

Rio de Janeiro
Dezembro de 2012

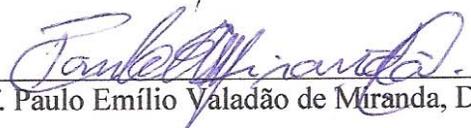
ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA BALANÇO DE PLANTA EM PILHA A
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM SINCRONISMO INTERNO NO
CONVERSOR DE POTÊNCIA

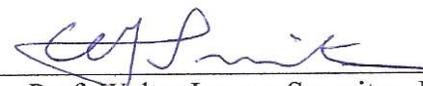
Sidney Odocio do Almo Torres

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

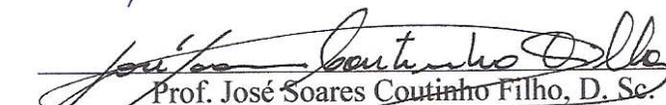

Prof. Antônio Carneiro de Mesquita Filho, Dr. d'Etat.


Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, D. Sc.


Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.


Prof. Sylvio José Ribeiro de Oliveira, Dr. Ing.


Prof. Sérgio Neves Monteiro, D. Sc.


Prof. José Soares Coutinho Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2012

Torres, Sidney Odocio do Almo

Estratégia de Controle para Balanço de Planta em Pilha a Combustível de Óxido Sólido com Sincronismo Interno no Conversor de Potência/ Sidney Odocio do Almo Torres. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

VIII, 122 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Antônio Carneiro de Mesquita Filho

Paulo Emílio Valadão de Miranda

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 92-102.

1. Balanço de Planta. 2. Pilhas a Combustível. 3. Energias Renováveis. 4. Eletrônica de Potência. I. Mesquita Filho, Antônio Carneiro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais pela confiança, esperança e oportunidade que depositaram em mim, para que hoje eu alcançasse esse ponto e a concepção ideológica necessária para dar início, conduzir e finalizar este trabalho.

Agradeço aos Professores Antônio Carneiro de Mesquita Filho e Paulo Emilio Valadão de Miranda por toda a orientação e conselhos fornecidos, configurando uma oportunidade fundamental para concretização do trabalho apresentado.

Agradeço ao Professor Sylvio José Ribeiro por toda a preparação fornecida no curso de mestrado e pela recomendação para esse curso de doutorado.

Agradeço aos Professores Walter Issamu Suemitsu e Sergio Neves Monteiro pela participação importante na banca de avaliação desse trabalho.

Agradeço ao Professor José Soares Coutinho Filho pela ajuda na correção e introdução de informações, o que contribuiu expressivamente na configuração dessa tese.

Agradeço aos Professores Carlos Vilhena e Rui Fonseca por todas as oportunidades que por eles me foram oferecidas, dentre elas o estágio no CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da PETROBRAS) e logo após a recomendação para o mestrado na COPPE, o que resultou no doutorado descrito nesse trabalho. De modo que, os vejo como grandes pessoas e profissionais que acreditaram em um jovem estudante tomado por idéias sem alicerce e viram nele um futuro profissional da engenharia com capacidades científicas.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA BALANÇO DE PLANTA PARA PILHA A
COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM SINCRONISMO INTERNO NO
CONVERSOR DE POTÊNCIA

Sidney Odocio do Almo Torres

Dezembro/2012

Orientadores: Antônio Carneiro de Mesquita Filho
Paulo Emilio Valadão de Miranda

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho desenvolveu uma estratégia de controle para balanço de planta em PaCOS (Pilha a Combustível de Óxido Sólido). Novas soluções foram concebidas para uma operação real de pilhas a combustível, considerando a aplicação estratégica de um pequeno banco de baterias como fonte complementar de energia elétrica e uma nova metodologia de otimização. Essa metodologia foi baseada na utilização de Algoritmos Genéticos para determinar a condição operacional mais eficiente para o sistema de geração elétrica, no qual a pilha a combustível opera em regime estacionário mesmo em condições dinâmicas de demanda de potência. De forma complementar, um conversor de potência composto de um elevador de tensão e um inversor foi simulado e construído. Esse conversor de potência opera aproveitando os processos transientes de carga e descarga dos elementos armazenadores de energia para a formação da onda senoidal na saída do conversor. Combinando as condições de operação encontradas na literatura para PaCOS com as soluções propostas para o balanço de planta, um modelo matemático foi aplicado em um programa de gerenciamento energético para simular a operação da pilha a combustível, considerando uma demanda de potência para uso residencial. Finalizando, protótipos em escala reduzida foram construídos e testados com sucesso, para confirmar a viabilidade e consistência da estratégia de controle proposta.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CONTROL ESTRATEGY FOR BALANCE OF PLANT FOR SOLID OXIDE FUEL
CELLS WITH INTERNAL SYNCRHONISM IN THE POWER CONVERTER

Sidney Odocio do Almo Torres

December/2012

Advisors: Antônio Carneiro de Mesquita Filho
Paulo Emilio Valadão de Miranda

Department: Electric Engineering

The present work has developed a control strategy for the balance of plant of SOFCs (Solid Oxide Fuel Cells). New solutions for real operation of fuel cells were conceived considering the strategic use of a small battery bank as a complementary source of electric energy and a new optimization methodology. The latter refers to the application of genetic algorithms to determine the most efficient operational conditions for the electric generation system, in which the fuel cell works at steady-state even under dynamic conditions of power demand. In addition to that, a power converter was simulated and built, being composed of a potential elevator and an inverter. This power converter operates in such a way to benefit from the loading and unloading transient processes of the energy storage elements for generating the converter's exit sine wave. Combining the SOFC operation conditions found in the literature with the balance of plant solutions proposed, a parametric model was used in a novel energetic management code to simulate the fuel cell operation by considering a power demand characteristic of a residential application. Finally, reduced scale prototypes were made and successfully operated to confirm the viability and consistency of the control strategy proposed.

Índice

1- Introdução	1
2- Revisão bibliográfica	3
2.1- Pilhas a Combustível.....	3
2.2- Fundamentos PaCOS	5
2.3- Perspectivas comerciais	7
2.4- Conceitos de Balanço de Planta	8
2.5- Sistemas de potência	9
2.6- Realizações.....	13
3- Proposta do trabalho	30
4- Modelagem.....	35
4.1- Análise eletroquímica.....	35
4.2- Análise térmica.....	38
4.3- Análise eletromecânica	39
4.4- Análise do conversor de potência	41
5- Algoritmo Genético	49
5.1- Introdução	49
5.2- Aplicação do Algoritmo Genético.....	53
6- Simulação.....	57
6.1- Estratégia de controle.....	57
6.2- Circuito de potência	61
7- Protótipos e medições	69
7.1- Conversor de potência.....	69
7.2- Controlador de potência	74
8- Discussão	81
9- Conclusões	90
10- Trabalhos futuros.....	91
11- Referência Bibliográfica.....	92
Anexos.....	103
A- Programação de otimização com Algoritmo Genético.....	103
B- Diagrama de programação da estratégia de controle no Simulink	111
C- Programas dos microcontroladores	115

1- Introdução

Muitos estudos e contribuições científicas têm sido feitas em relação ao controle de equipamentos e nesse cenário o tema estratégia de controle vem tomando cada vez mais importância, tendo em vista os recentes avanços tecnológicos e o grande número de possibilidades para implementação dos mecanismos de controle. Basicamente uma estratégia de controle é definida como uma metodologia utilizada para acionar, monitorar, condicionar e estabelecer configurações, introduzindo processos que agreguem flexibilidade e aumento da eficiência dentro dos parâmetros exigidos [1, 2].

Tópicos de pesquisa sobre novas e mais eficientes tecnologias de geração de energia estão sendo globalmente encorajados, tanto para tecnologias baseadas em combustíveis fósseis como não-fósseis. Dentro das perspectivas mais recentes estão as Pilhas a Combustível (PaC), que podem ser definidas como um equipamento eletroquímico capaz de transformar energia química em energia elétrica e calor, fazendo isso com alto nível de eficiência na conversão. Basicamente uma PaC consiste de uma placa de tripla camada, contendo duas camadas de eletrodos porosos separados por uma camada de eletrólito, a qual é responsável por conduzir os íons de um eletrodo para o outro [3, 4]. Um eletrodo (anodo) entra em contato com o combustível e o outro (catodo) entra em contato com o oxidante (geralmente ar), conforme exemplificado na Figura 1.1, que mostra a estrutura interna de uma pilha a combustível de óxido sólido (PaCOS). Com base nas reações ocorridas no interior da PaC é produzida uma diferença de potencial entre os eletrodos, a qual é utilizada para suprir uma demanda de carga ligada em seus terminais.

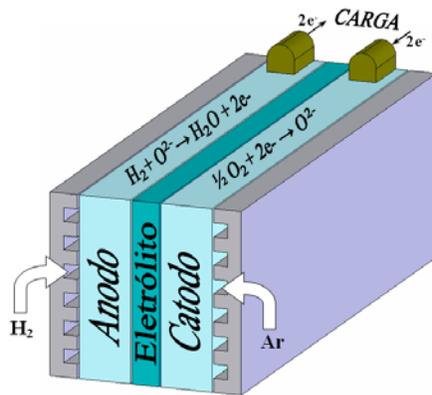


Figura 1.1 – Estrutura interna de uma Pilha a Combustível de Óxido Sólido.

As PaCOS, que fazem parte do objetivo desse trabalho, podem ser caracterizadas por serem compostas de materiais cerâmicos que operam em altas faixas de temperatura, compreendidas entre 600-1000°C, o que sugere seu uso bastante favorável em aplicações com cogeração [5]. Em função das altas temperaturas de operação, a PaCOS oferece a oportunidade de reforma interna ou oxidação direta do combustível utilizado, e assim, permitindo a utilização de etanol, gás natural, propano, metanol, gasolina, diesel, entre outros, evitando uma dispendiosa reforma externa e simplificando o armazenamento de combustível [6].

A análise e desenvolvimento de plantas de geração de potência baseadas em PaC são estruturadas em um apurado balanço energético do sistema, seja ele térmico, elétrico, químico, ou ambos. Esse balanço engloba a seleção e configuração dos dispositivos que darão suporte ao funcionamento da PaC, fornecendo gases, extraíndo ou introduzindo água, resfriando, aquecendo e gerenciando o fornecimento de potência [1, 3]. O balanço de uma planta de geração de potência baseada em PaC é composta por duas partes fundamentais, descritas pela estratégia de controle e equipamentos de suporte à operação da PaC. Rotineiramente esse balanço é chamado apenas de Balanço de Planta (BdP), que expressa a arquitetura de gerenciamento do funcionamento, ou seja, todo o aparato que não é a PaC propriamente dita.

Geração distribuída é definida como uma geração com uma potência limitada (abaixo de 10MW), que é interconectada a uma subestação ou alimentadores de distribuição, com o objetivo de abastecer a rede local [7, 8]. O principal objetivo da geração distribuída é descentralizar o sistema de distribuição de energia, procurando reduzir o impacto na geração em larga escala, especialmente relacionado a efeitos sobre a malha de fornecimento elétrico [8, 9]. Vários governos pelo mundo promovem amplamente a geração distribuída de potência usando fontes de energias renováveis. Neste caso, pode ser dito que o conceito de alta qualidade de potência em geração distribuída é relativamente novo em termos flexibilidade operacional e controlabilidade de sistemas de potência [10].

Com o grande aumento na demanda de energia elétrica e suas aplicações, a necessidade de equipamentos que modifiquem a forma de energia elétrica e agreguem características específicas é cada vez maior. Tais equipamentos são chamados de conversores de potência, que são definidos como equipamentos eletrônicos capazes de

mudar a forma e características da energia elétrica, promovendo o condicionamento e aumento da qualidade [10 - 12]. Os conversores de potência são equipamentos baseados em dispositivos de estado sólido (semicondutores) e utilizam seqüências de comutações de interruptores para sua operação. Em função desses processos de chaveamento dos interruptores esses equipamentos apresentam características de cargas não lineares, as quais são prejudiciais para distribuição e consumo da energia e geralmente necessitam de filtros para atenuar ou eliminar esse problema [13 - 15].

2- Revisão bibliográfica

2.1- Pilhas a Combustível

A evolução no projeto de pilhas a combustível, junto com a considerável evolução nas técnicas de controle, permite o seu desenvolvimento para diversas aplicações, com a possibilidade de um controle de desempenho otimizado, o que vem configurando uma alternativa promissora em conjunto com sua alta eficiência, baixo impacto ambiental, e modularidade [16, 17]. Porém, PaCs ainda são um bom exemplo de complexidade por incluírem várias funcionalidades interligadas, como eletromecânica, elétrica, eletroquímica, fluidas, e térmicas, que na maioria das aplicações têm que responder dinamicamente às solicitações de potência. Não-linearidade e tempo de resposta dinâmica de PaC são bons exemplos de fatores que acarretam em complexidade para um projeto de controle e operação voltado para o melhor desempenho [15, 18, 19].

A complexa dinâmica não-linear das PaCs é usualmente descrita de forma aproximada pelos princípios da eletroquímica, dinâmica dos fluidos, e transferência de calor, que através de parâmetros físicos, propriedades de materiais, e constantes universais empregam várias considerações e restrições [20, 19]. A classificação das PaCs é feita basicamente em função do eletrólito, o qual determina suas características de operação e desempenho, assim como as vantagens e limitações do equipamento. Uma PaC consiste de dezenas ou centenas de pilhas unitárias conectadas em série ou paralelo [21], porém, no

momento células unitárias e pequenos módulos são o ponto principal dos esforços de pesquisa. Nessa área, projetos conceituais de sistemas completos são importantes áreas para otimizar, em função da sua grande influência sobre a eficiência média [22]. Uma grande vantagem das PaCs está na modularidade, permitindo associar determinado número de PaC de acordo com a demanda ou porte do projeto, tendo em vista que o efeito de escala influencia substancialmente somente na eficiência dos sistemas auxiliares. Nesse contexto, a tecnologia de PaC é particularmente atrativa para aplicações em escala residencial, para as quais a potência média da rede está abaixo de 5kW [23], onde W corresponde a unidade de potência Watt, para aplicações elétricas.

Outro parâmetro importante na PaC é a temperatura, que é considerada um fator essencial para eficiência. Geralmente um dispositivo de ventilação é adicionado para homogeneizar a temperatura e assegurar o controle térmico no equipamento. A não uniformidade no fluxo do ar de resfriamento entre pilhas conduz a uma considerável variação da temperatura, que gira em torno de 8°C [24]. Essas variações de temperatura resultam em diferenças de tensão entre as células unitárias, reduzindo a potência elétrica total produzida. No funcionamento de PaC uma grande parte da energia gerada é dissipada na forma de calor, alcançando aproximadamente 50% do total produzido, onde o calor liberado no funcionamento está diretamente relacionado com a tensão gerada. A administração de ar no controle da temperatura ainda é um desafio, em função das tecnologias dos compressores e sopradores, que não são idealmente ajustáveis e possuem tempos de resposta bem diferentes dos necessários para as respostas eletroquímicas e elétricas [25 - 28].

Após o processo de partida da PaC a demanda interna de energia e calor é auto-suportada pelo sistema. Com a alta eficiência na conversão de combustível em eletricidade as PaCs vêm apresentando várias vantagens frente a outras opções de geradores, principalmente para aplicações em metrópoles com alto nível de poluição, considerando o baixíssimo nível de emissões provocado pelas PaCs [29, 23]. Porém, ainda existem objetivos a serem alcançados que dificultam a aplicação bem sucedida das PaCs, como o longo ciclo de vida e um bom comportamento transiente [30]. A capacidade transiente ainda é, em grande parte, limitada pelo balanço na planta de geração de potência, que é requerido para manter o sistema dentro das melhores faixas de operação e com

comportamento otimizado. Geralmente essas limitações podem resultar de técnicas conservativas de controle ou de inevitáveis baixas respostas dos componentes nos subsistemas [31 - 33].

A utilização de PaC para aplicações automotivas e residenciais é uma realidade altamente promissora para ajudar nas questões ambientais relacionadas a poluição. Nesse cenário, dois tipos de PaC vem se destacando nos últimos anos, tanto no ambiente científico como nas perspectivas comerciais de aplicação, que no caso são as pilhas a combustível com membrana de troca de prótons ou membrana polimérica (PEM) e as pilhas a combustível de óxido sólido (PaCOS) [34 - 36]. O balanço na planta de geração de potência, amplamente conhecido como balanço de planta (BdP), é muito parecido para os dois tipos de PaCs, com diferença em pontos específicos que caracterizam a operação da PaC, e assim, rotineiramente o BdP voltado para PaCOS tem buscado alternativas, fundamentos, e formulações em trabalhos desenvolvidos para pilhas PEM [37 - 41].

2.2- Fundamentos PaCOS

As oportunidades de co-geração, simples tecnologia de reforma interna e oxidação direta, não necessidade de administração de água, em conjunto com as características de alta eficiência elétrica, catalisadores menos nobres e baixo ruído, fazem da PaCOS um potencial candidato para substituir o tradicional ciclo térmico de geração de potência [42, 43]. Porém, a condição de operação da PaCOS é restringida primeiramente pelas tensões mecânicas geradas pelas variações térmicas nos componentes cerâmicos e metálicos, principalmente na montagem das camadas de anodo, eletrólito e catodo, provocando danos que afetam o desempenho e o tempo de vida da PaCOS. A variação de temperatura na PaCOS também pode causar a degradação, danificando permanentemente o equipamento devido à fadiga térmica ou ruptura térmica dos materiais [3, 44], acarretando na necessidade de processos suaves de aquecimento e resfriamento.

Durante a operação da PaCOS um dos efeitos prejudiciais ao seu desempenho é a deposição de carbono na câmara do anodo, devido à quebra de hidrocarbonetos do

combustível e a oxidação da base de níquel do anodo. A grande presença de componentes sulfurados no combustível também é um problema para operação do equipamento e geralmente uma cama de carbono ativado é usada para reter o H_2S contido no combustível. Outra restrição acontece quando a PaCOS fica conectada a uma carga que consome corrente e o material do anodo passa ser oxidado em vez do combustível, consumindo íons de oxigênio e produzindo elétrons [45]. Mas uma limitação fundamental na capacidade de manter a carga é a diminuição na quantidade de hidrogênio no compartimento do anodo, iniciando um processo de difícil controle. Outros grandes desafios para promover a difusão na aplicação de sistemas PaCOS estão relacionados ao aumento no tempo de vida da PaCOS, redução no custo de produção e a diminuição da temperatura de operação e melhora no ajuste de carga [42, 46, 47]. O que também limita o desempenho da PaCOS é a resposta química do processamento de combustível, que é usualmente lento devido ao tempo necessário após a mudança de fluxo dos reagentes [48].

Uma PaCOS consiste de uma estrutura de tripla camada composta de dois eletrodos porosos de cerâmica (anodo e catodo), separados por um denso eletrólito de cerâmica, que geralmente assegura uma condutividade eletrônica quase nula. No catodo o oxigênio é consumido para formar íons de oxigênio pela obtenção de elétrons, já o eletrólito sólido permite o fluxo de íons de oxigênio para o anodo, onde eles eletro-oxidam o hidrogênio produzindo calor, água e elétrons [44], conforme exemplificado na Figura 2.1. Essas PaCOS são construídas com eletrodos sólidos que promovem a condução unipolar do íon O^{2-} e o eletrodo mais conhecido para esse equipamento é composto por Zircônia estabilizada com Ytria, que é dopada com dióxido de Zircônio [4]. Nesse processo a temperatura tem um efeito significativo sobre as características elétricas da PaCOS, tais como tensão e densidade de corrente. Com essas características a PaCOS pode alcançar eficiência em torno de 50%, ou superiores em conjunto com processos de cogeração, configurando uma opção atrativa para tecnologias de geração distribuída. Essas características em conjunto com a flexibilidade na utilização de combustível vêm gerando altas perspectivas de pesquisa para uso dessa tecnologia em aplicações estacionárias e móveis, considerando as conhecidas dificuldades associadas ao armazenamento de hidrogênio puro [49 - 52].

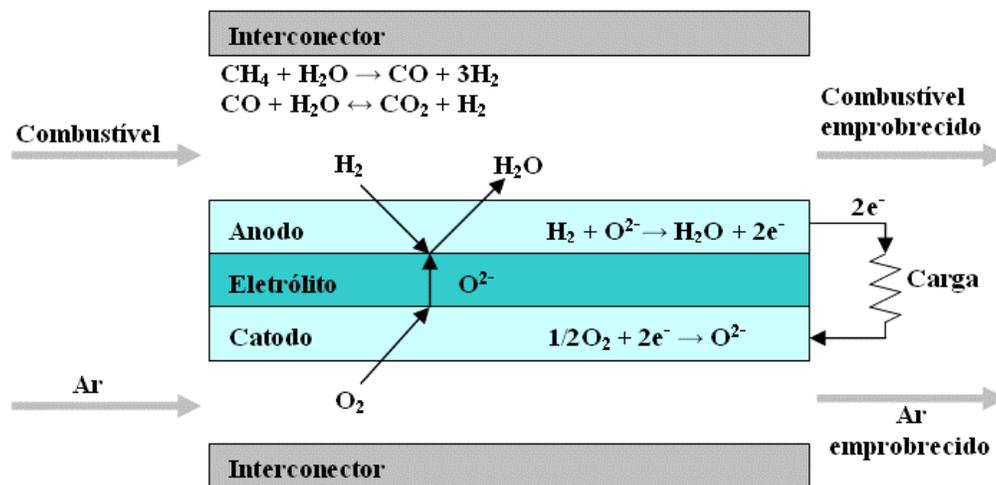


Figura 2.1 – Esquema de reações internas de uma Pilha a Combustível de Óxido Sólido.

2.3- Perspectivas comerciais

O efeito combinado da industrialização, aumento do padrão de vida e o crescimento demográfico nos últimos 50 anos tem gerado uma elevação no consumo de energia em quase todas as regiões do mundo. Nesse contexto a PaCOS vem aparecendo com altas perspectivas comerciais, impulsionadas principalmente pelas preocupações ambientais e grandes evoluções tecnológicas nas áreas de materiais e sistemas de controle. Porém, para atender as tendências do mercado o custo e a durabilidade são geralmente considerados como os maiores desafios para comercialização das PaC [53, 28]. Alternativamente, o sistema híbrido de PaCOS combinado com co-geração tem sido visto como uma tecnologia superior para geração de potência, em comparação com outras opções disponíveis no mercado [54 - 56]. Apesar disso, essa tecnologia ainda não está competitiva para as unidades tradicionais de geração de energia, do ponto de vista econômico e de confiabilidade operacional. No caso das aplicações veiculares, o custo, o armazenamento do combustível e a flexibilidade em regimes transientes de operação ainda são limitantes

para viabilização comercial na área de transportes, considerando que em aplicações veiculares cerca de 80% das solicitações ocorrem em regime transiente de operação [38].

Considerando as diferentes perspectivas comerciais dos dois principais tipos de pilhas a combustível, é observado que a PaCOS possui destaque em vários aspectos, gerando uma expectativa de viabilidade comercial muito alta em relação a PEM. Os principais aspectos favoráveis da PaCOS em termos de comercialização podem ser listados como flexibilidade no combustível, catalisador de materiais menos nobres, processos de fabricação já conhecidos e difundidos, oportunidade de co-geração, baixo nível de contaminação dos componentes internos, e alta eficiência na conversão de energia [57, 58]. Com isso, as perspectivas comerciais indicam que a implementação da PaCOS em larga escala na geração de energia é apenas uma questão de tempo de pesquisa no aperfeiçoamento da tecnologia.

2.4- Conceitos de Balanço de Planta

O Balanço de Planta (BdP) possui um grupo de componentes de sistema que fornece reagentes, remove o calor gerado, remove a água produzida e controla atuadores, relacionando todos os periféricos necessários para integração do sistema, tais como bombas de líquido, sopradores, compressores, válvulas, isolamentos, sensores, trocadores de calor, e condicionadores de potência [3, 59]. Para o gerenciamento desses periféricos existe um grande número de modelos descrevendo o comportamento em estado de equilíbrio de PaC, estimando a tensão com base em um certo ponto de operação, mas modelos capazes de prever o processo transiente entre dois pontos de estado de equilíbrio são raros [38].

Procurando suportar a modelagem e simulação, vários métodos têm sido adotados usando equivalências energéticas nos domínios elétrico, mecânico, térmico e hidráulico, enfrentando a grande dificuldade expressa pela considerável diferença no tempo de resposta em cada domínio. Geralmente modelos físicos descritos por equações diferenciais usualmente complexas são aplicadas, acarretando em um período de processamento computacional relativamente grande, o que prejudica o desempenho da PaC [60 - 62]. De

acordo com a experiência no desenvolvimento de sistemas baseados em Pilhas a Combustível, é sugerida como uma razoável divisão de volume: 1/3 para pilha, 1/3 para o reformador e 1/3 para o BdP, o que no caso de reforma interna ou hidrogênio puro acarreta em uma estimativa de 50% do volume para a pilha e 50% para o BdP.

Sistemas de PaC necessitam de uma base de medições do estado do sistema através da aplicação de sensores, tal como termômetros, transdutores de pressão, voltímetros, sensores de efeito hall, detectores de hidrogênio, entre outros. Esses sinais são tipicamente transformados em uma realimentação para um microprocessador, que calcula a próxima ação de controle baseada em uma estratégia de controle específica, a qual está atrelada à configuração adotada para o sistema e atua sobre os dispositivos periféricos [63]. Com isso, processos de simulação do sistema são fundamentais para alcançar um ótimo uso do combustível, assim como assegurar um bom compromisso entre investimento financeiro e eficiência da planta de geração [22]. A utilização de combustível é um dos parâmetros mais importantes na operação de PaC e tem efeito significativo sobre a voltagem e eficiência, onde processos de recirculação dos gases representam uma prática comum em projetos de PaC para aumento do desempenho.

Quando uma carga elétrica é conectada a uma PaC, o sistema de controle deve procurar o ponto de operação, estabelecendo certa prioridade na manipulação dos parâmetros, buscando evitar condições de degradação e redução na vida da PaC [30]. Um parâmetro usual na análise de operação em PaC é a densidade de corrente, que é obtida através dos modelos de polarização e geralmente é utilizada na otimização de componentes e identificação de problemas. O principal desafio no desenvolvimento de estratégias de controle baseadas em informações sobre a densidade de corrente é sua interpretação [64].

2.5- Sistemas de potência

Com o desenvolvimento industrial e o considerável crescimento populacional o problema da falta de energia é cada vez mais agravado, intensificando a necessidade de fontes alternativas no sistema de geração de energia [65]. Nos últimos anos a qualidade de

energia se tornou uma significativa preocupação, tanto para indústria como para os consumidores residenciais. Com o mercado de energia desregulado e o aparecimento de proteções ambientais, mais e mais unidades de geração distribuída são incluídas na rede de distribuição de energia [7].

Qualidade de energia é um termo relativo, que pode ter diversos significados para diferentes pessoas, como por exemplo, para um cliente, que observa um problema de qualidade de energia como qualquer condição irregular de fornecimento elétrico que pode causar um mau funcionamento ou impedir o uso da energia [13, 10]. Em uma perspectiva comercial, um problema em qualidade de energia pode ser considerado como a não conformidade com certos padrões de tensão ou a apresentação de harmônicos. Como a definição precisa para qualidade de energia é considerada uma questão problemática, esse parâmetro tem sido expresso de forma melhor através da qualidade de tensão, tomando como base o desvio para uma senóide de tensão perfeita [11, 14]. A Figura 2.2 mostra as interferências típicas que podem ocorrer em um sistema de fornecimento de energia e a Figura 2.3 mostra os componentes harmônicos que podem existir em um sinal de tensão.

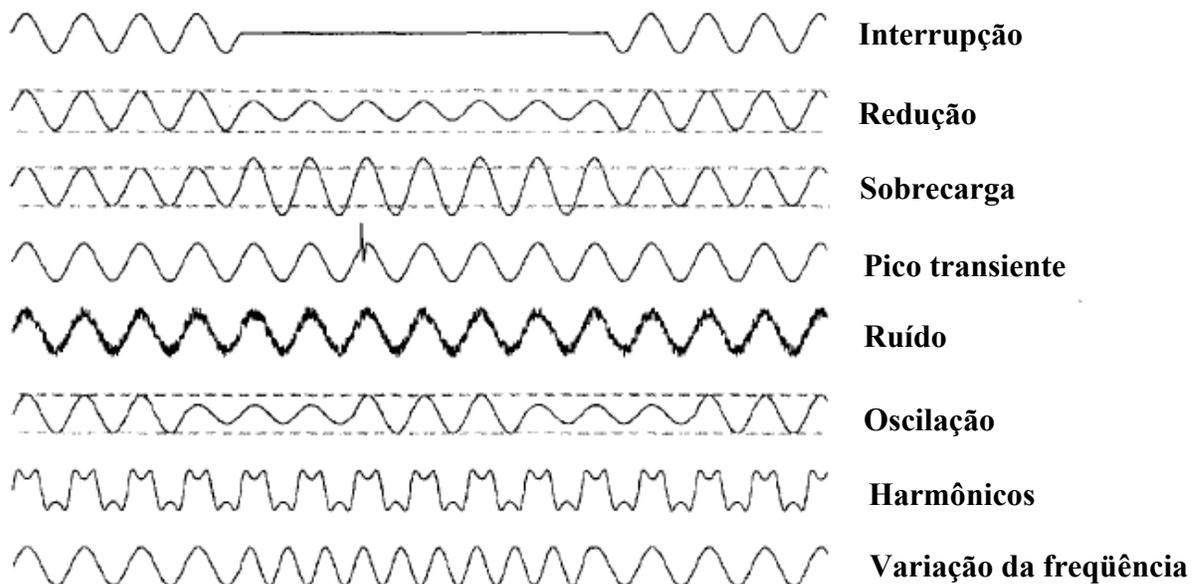


Figura 2.2 – Principais distúrbios no fornecimento de energia (BROWN [11]).

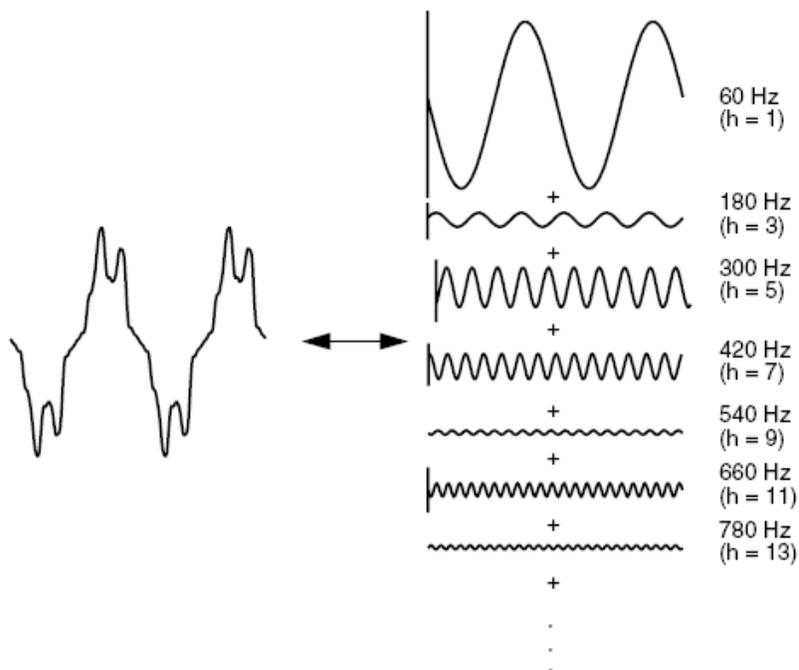


Figura 2.3 – Série de Fourier da distorção harmônica (DUGAN *et al.* [10])

Preocupações com a qualidade de energia e os problemas relacionados são conseqüências do aumento no uso de dispositivos de estado sólido no chaveamento e de sistemas de potência desbalanceados, como retificadores e inversores de plantas industriais [66, 16, 15]. Nesse cenário de tecnologia a busca por conversores que provoquem o mínimo de interferência na linha de transmissão é cada vez mais intensa. Em muitas aplicações não é somente importante a quantidade energia, mas também a sua qualidade fornecida, que em alguns casos pode ser avaliada em função da sua capacidade de realizar trabalho útil [67].

Com o desenvolvimento da tecnologia de eletrônica de potência, dispositivos de potência estão ganhando grandes melhorias de eficiência e custo. Um grande problema na qualidade de potência envolve a variação na tensão ou na corrente do serviço elétrico, tal como flutuações de tensão, momentâneas interrupções e oscilações transientes, causando falha ou má operação de equipamentos [18, 66]. Apesar de muitos trabalhos de pesquisa abordarem a detecção e classificação de distúrbios na qualidade de energia, o objetivo de identificar o distúrbio no ambiente de transmissão e a correta classificação da natureza do

mesmo ainda é um desafio. O constante aumento na conexão de conversores para geração distribuída, combinado com o grande aumento de cargas não-lineares conectadas ao sistema de potência elétrica têm levado a uma degradação na qualidade de energia, o que pode se propagar através do sistema de distribuição [68].

Devido às transições de liga e desliga nas chaves é gerada uma combinação de interferências no sistema de fornecimento de potência. Os principais distúrbios que podem ser ocasionados na geração e transmissão de potência são definidos como harmônicos, que frequentemente são reduzidos ou eliminados com filtros passivos e ativos [69]. Filtros passivos são baratos e efetivos para eliminar um ou mais componentes harmônicos predefinidos, porém, sua performance é dependente da impedância do sistema de potência. Filtros passivos também podem gerar condições indesejáveis de ressonância. Já os filtros ativos são capazes de compensar grande parte dos harmônicos, mas eles ainda são muito caros [70]. Praticamente todos os dispositivos de chaveamento eletrônico produzem harmônicos devido a seu tempo de atuação, a qual interage com o sistema CA para causar distorções de tensão e corrente no sistema de potência [71]. Também o fenômeno de ressonância harmônica em sistemas de potência é conhecido por causar altos níveis de distorção e até mesmo falhas em componentes no sistema de potência. Com isso, a redução na distorção de harmônicos se torna um importante aspecto na preocupação sobre qualidade de potência [48].

Administração de temperatura é um aspecto básico no projeto e operação de conversores de eletrônica de potência, uma vez que a temperatura é um fator crítico, o qual pode influenciar no desempenho do equipamento [72]. O funcionamento de um dispositivo de chaveamento em eletrônica de potência é limitado não somente pela temperatura instantânea da junção do dispositivo, mas também por essa variação. Mesmo se um dispositivo sempre operar abaixo da máxima temperatura permissível, a repetição de transientes térmicos pode ter influência sobre a confiabilidade [73]. O completo tratamento combinando os sistemas térmicos e elétricos de um dispositivo requer a integração de um amplo modelo físico com um completo modelo de elementos finitos e danos térmicos. Ressaltando que, medições diretas de temperatura no dispositivo podem ser bastante difíceis e caras [74].

Modelos ideais de diodos e chaves controladas estão em uma classe de sistemas dinâmicos híbridos, os quais consistem de equações diferenciais com descontinuidades não-lineares e sinais de excitação externa. O entendimento do comportamento dinâmico desses sistemas é importante para permitir o projeto de conversores de potência mais robustos e mais eficientes. Uma análise detalhada de um modelo híbrido para conversores de potência é difícil devido a interação potencialmente complexa entre a dinâmica não-linear e o sinal externo [75].

O método de eliminação seletiva de harmônicos por PWM (*pulse width modulation*) permanece muito interessante para o controle de conversores de fontes de alta potência. Esses conversores correspondem à tecnologia chave por trás das aplicações avançadas associadas a modernos sistemas de potência. Nessas aplicações, os semicondutores GTO (*gate turn-off*) e mais recentemente os IGCT (*integrated gate controlled thyristor*) são tipicamente usados como um bloco de construção, e a frequência de chaveamento é normalmente baixa. A seleção do ângulo de comutação do inversor dá algum grau de liberdade na minimização de certos harmônicos, assim como na redução da distorção harmônica total [70, 76, 77].

A resposta característica de um sistema combinado para cargas dinâmicas pode ser alcançada gerando apropriadamente o sinal de chaveamento para o inversor CC/CA. A tensão CA pode ser regulada pelo índice de modulação e a potência ativa pode ser controlada pelo ângulo de potência. Os estudos nessa área apresentam que o algoritmo de controle *Fuzzy* é capaz de melhorar a faixa de desempenho em comparação aos métodos convencionais, tanto para cargas lineares como não-lineares. Este método requer apenas as regras lingüísticas de controle para o ponto de potência máxima [65, 78].

2.6- Realizações

Muitos estudos e desenvolvimentos têm sido realizados na área de geração de potência através de PaC, como o trabalho apresentado por SORRENTINO *et al.* [25], que realizou a análise de um sistema de PaCOS para definir um teste de controle e estratégia de gerenciamento, aplicando um modelo de resposta dinâmica da PaCOS e trocadores de calor

para algumas condições de operação (Figura 2.4). Nesse trabalho foram desenvolvidas estratégias que procuram aumentar a performance mantendo a temperatura em limites seguros, e assim, reduzindo a degradação de componentes devido ao stress térmico.

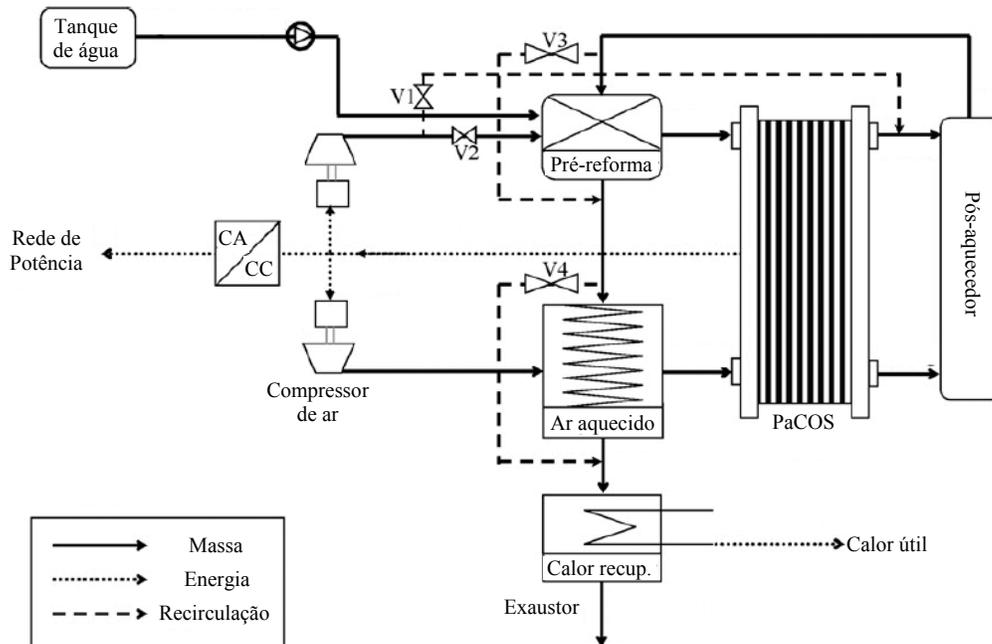


Figura 2.4 – Planta de geração de potência PaCOS (SORRENTINO *et al.* [25]).

No trabalho de HUANG *et al.* [26] foi apresentada uma análise dos principais componentes de um sistema de potência PaCOS com base nas equações destes, considerando as perdas associadas e efeitos dinâmicos que afetam a geração de energia. O trabalho também faz uma abordagem sobre o problema e desafios existentes no controle de PaCOS e a importância de uma estratégia de controle eficiente no gerenciamento desse equipamento. A Figura 2.5 mostra a configuração utilizada, que possui um módulo otimizador para os principais parâmetros do sistema PaCOS.

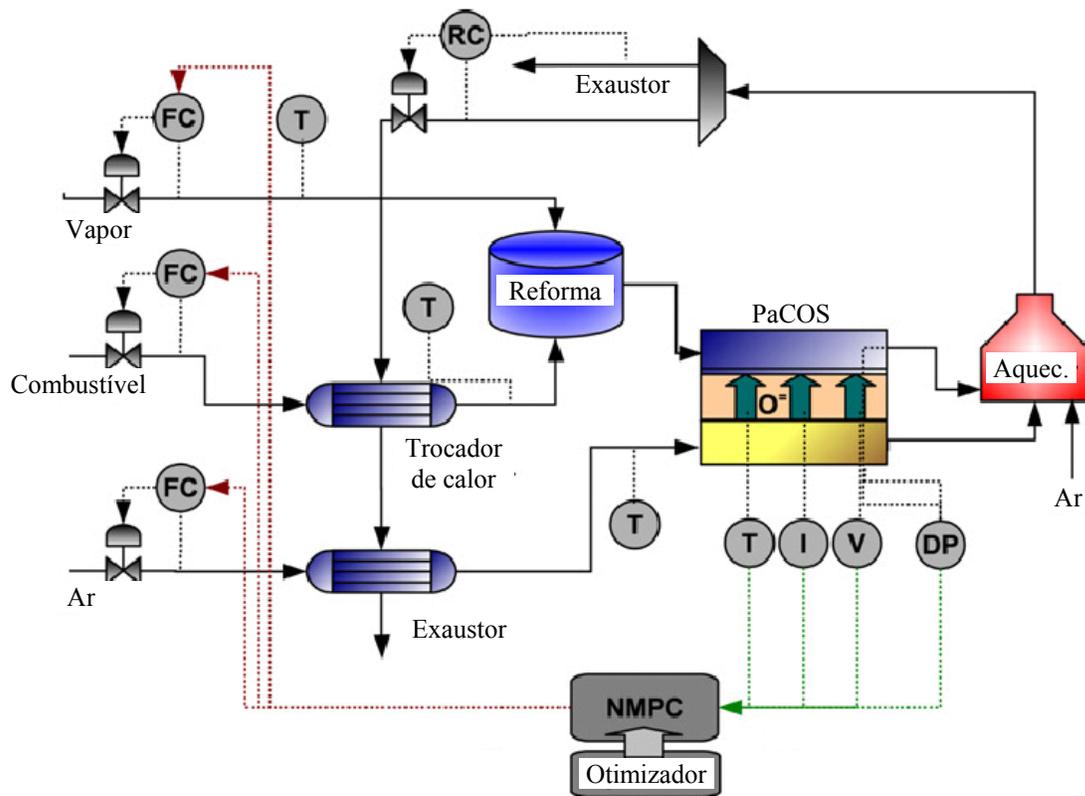


Figura 2.5 – Configuração do sistema de potência PaCOS (HUANG *et al.* [26]).

No trabalho apresentado por ANG *et al.* [32] foi abordada uma modelagem e otimização PaCOS, considerando o dimensionamento e definição de configuração. Nesse trabalho foi apresentada uma configuração para aplicação residencial (Figura 2.6), com micro-cogeração de potência e com possibilidade de fornecimento de potência a rede elétrica. Esse trabalho busca definir configurações alternativas e mais ajustáveis as necessidades e possibilidades de fornecimento de energia.

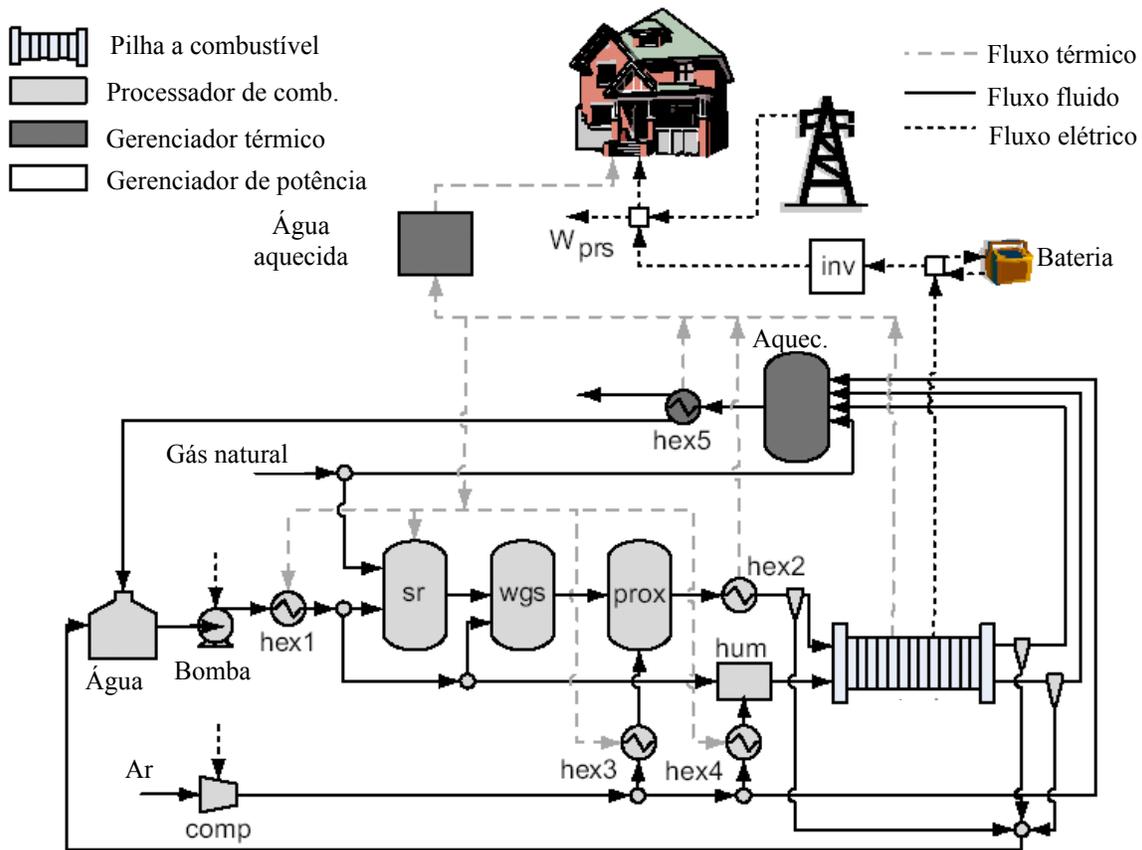


Figura 2.6 – Sistema PaCOS com micro-geração de potência (ANG *et al.* [32]).

O estudo e análise desenvolvidos por ADZAKPA *et al.* [24] na distribuição da temperatura em um típico resfriamento de PaC avalia o impacto sobre o sistema e caracteriza a influência do dispositivo de resfriamento sobre o comportamento da PaC, com uma modelagem de dinâmica térmica em três dimensões. O protótipo desenvolvido e a sua respectiva distribuição de resfriamento são apresentados na Figura 2.7.

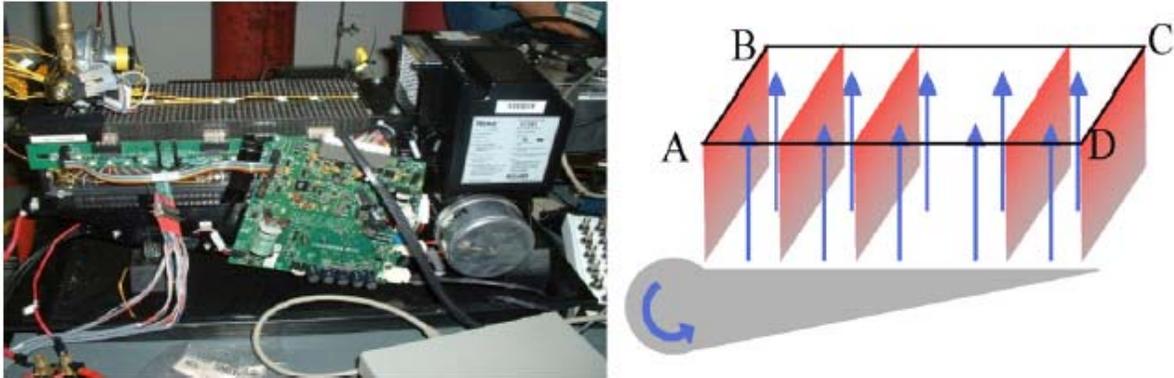


Figura 2.7 – Protótipo da Pilha a Combustível com diagrama de distribuição do resfriamento (ADZAKPA *et al.* [24]).

Também explorando os parâmetros térmicos, AHN e CHOE [37] propuseram o projeto de um controle para o fluxo de resfriamento, baseado em um conjunto de regras que assegurem alta confiabilidade e eficiência da PaC, controlando a temperatura e seus efeitos sobre o desempenho do equipamento.

No trabalho proposto por YANG *et al.* [19] foi introduzida a aplicação de um modelo de referência adaptativa para controlar uma PaC de baixa potência, fornecendo uma estratégia que regula a tensão e a corrente através do ajuste no fluxo de ar e de hidrogênio, conforme esquematizado na Figura 2.8.

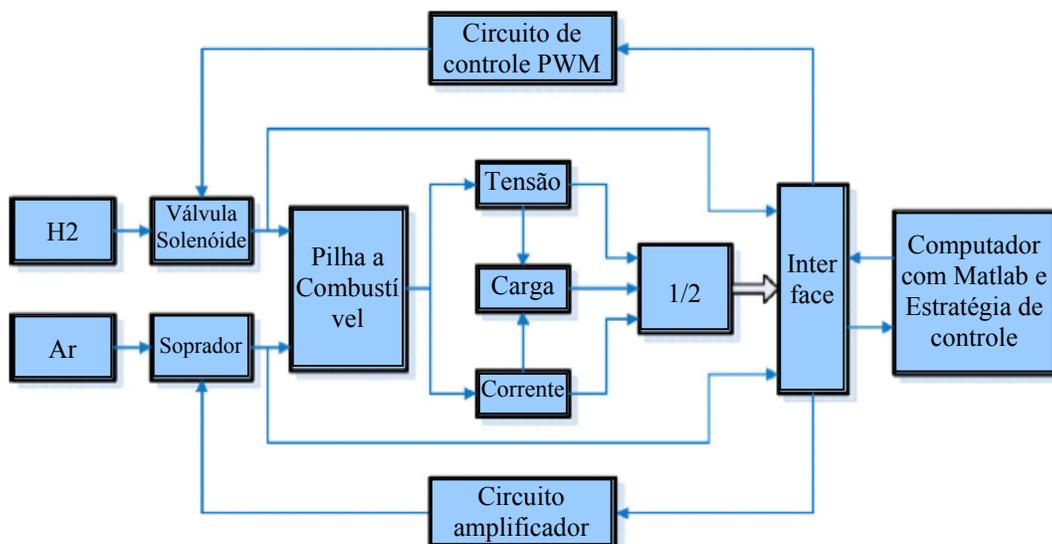


Figura 2.8 – Diagrama do controle de referência adaptativa (YANG *et al.* [19]).

No caso do trabalho apresentado por MCKAY *et al.* [39] foi descrito um modelo dinâmico simples com fluxo isotérmico que prevê o comportamento temporal, buscando identificar a estimativa de tensão na PaC, do transporte de massa no eletrólito e do acúmulo de água líquida. Esse modelo permite a previsão do grau de inundação dentro da estrutura da PaC e automaticamente a queda de tensão no tempo. Utilizando um complexo sistema de conversão de energia BLUNIER e MIRAQUI [40] apresentaram as vantagens de uma modelagem que permite que o grupo de projeto reparta o trabalho em várias partes e valide cada uma independentemente, alcançando alto nível de detalhes sobre os subsistemas gerados no projeto da PaC, como apresentado nas Figuras 2.9 (a) e 2.9 (b).

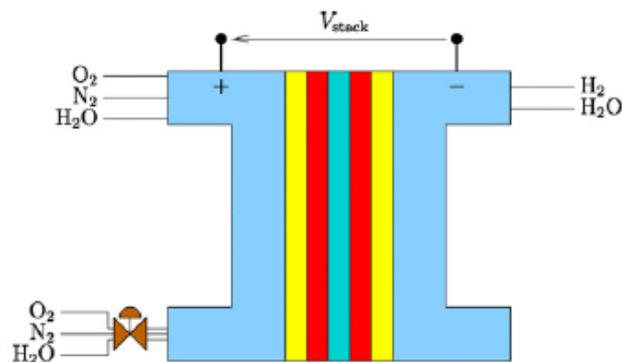


Figura 2.9 (a) – Níveis estruturais na Pilha a Combustível (BLUNIER e MIRAQUI [40]).

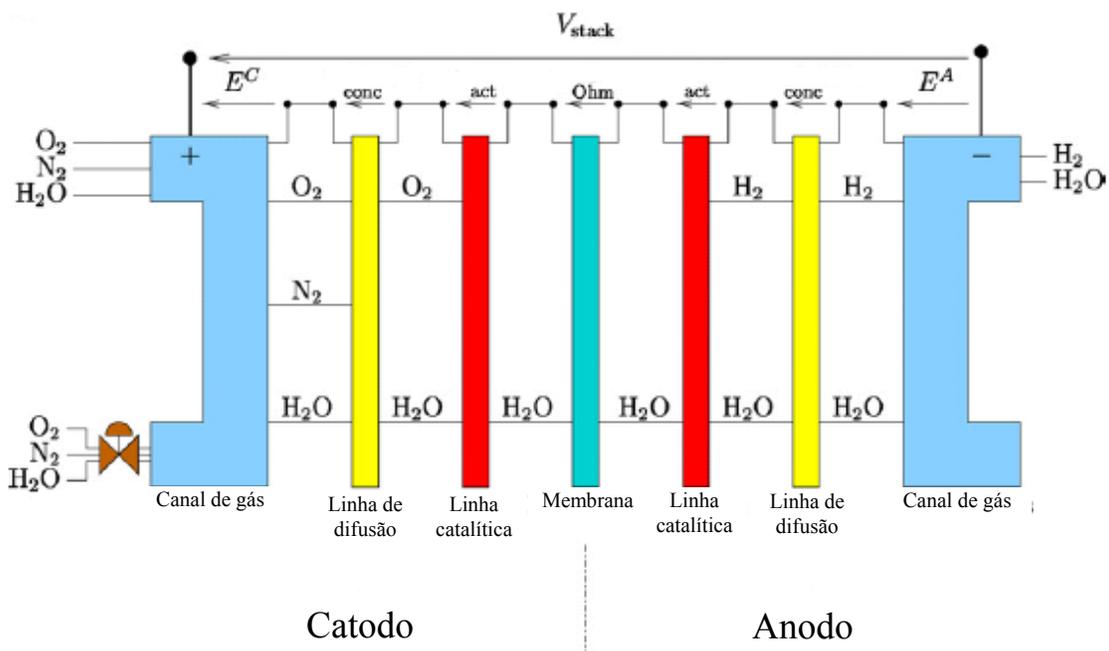


Figura 2.9 (b) – Parcelas de análise dos níveis estruturais (BLUNIER e MIRAQUI [40]).

Unindo uma parte estática não-linear a uma parte dinâmica linear, a modelagem de HUO *et al.* [21] apresenta uma proposta de controle e simulação utilizada na análise de características transientes em PaC. Esse trabalho construiu um modelo dinâmico para a tensão da PaC como uma função do gás incidente. E no estudo e desenvolvimento de LISBONA *et al.* [22] para um sistema de distribuição descentralizada na produção de eletricidade, foi apresentado um método que revelou ser uma poderosa ferramenta para avaliação de desempenho de PaC. Através desse método a estratégia de controle é direcionada para manter a alta eficiência do sistema sobre operações de cargas parciais, focando um sistema gerador de potência e calor PaCOS de 1kW de potência nominal. No caso de SCHULZE *et al.* [64] foram propostos três diferentes técnicas para determinação da densidade de corrente, utilizando resistências externamente conectadas e sensores de efeito Hall no interior dos segmentos, resultando no protótipo apresentado nas Figuras 2.10 e 2.11.

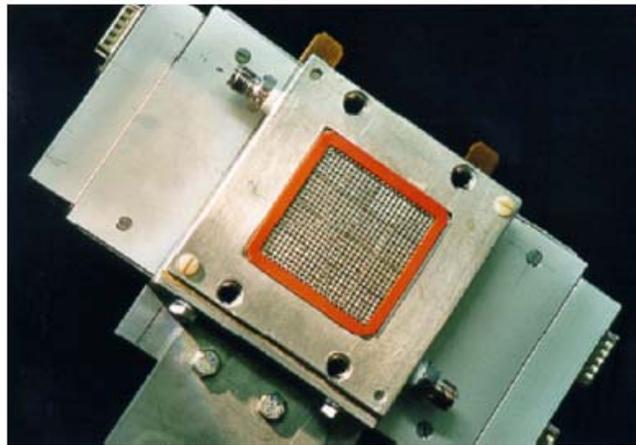


Figura 2.10– Protótipo com 16 placas com área ativa de 5cm X 5cm (SCHULZE *et al.* [64]).

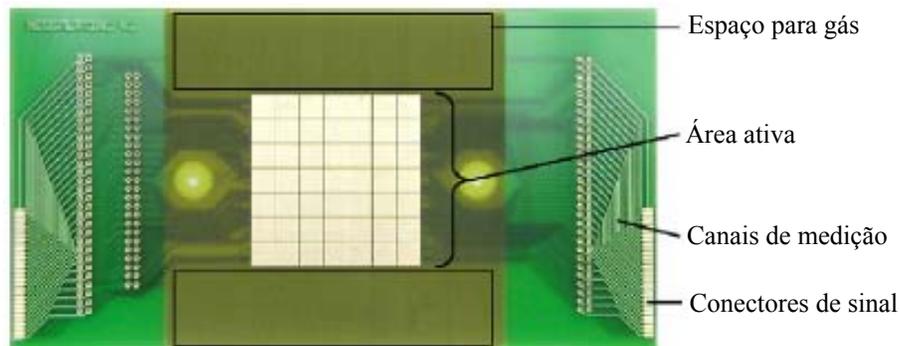


Figura 2.11 – Segmento de uma célula unitária (SCHULZE *et al.* [64]).

Buscando um modelo matematicamente simples, CHU *et al.* [41] estudaram o desenvolvimento de um modelo de estrutura contendo três volumes de controle, descritos pelo anodo, catodo, e eletrólito, esquematizado na Figura 2.12, onde o modelo do eletrólito captura o comportamento dinâmico para o controle proposto.

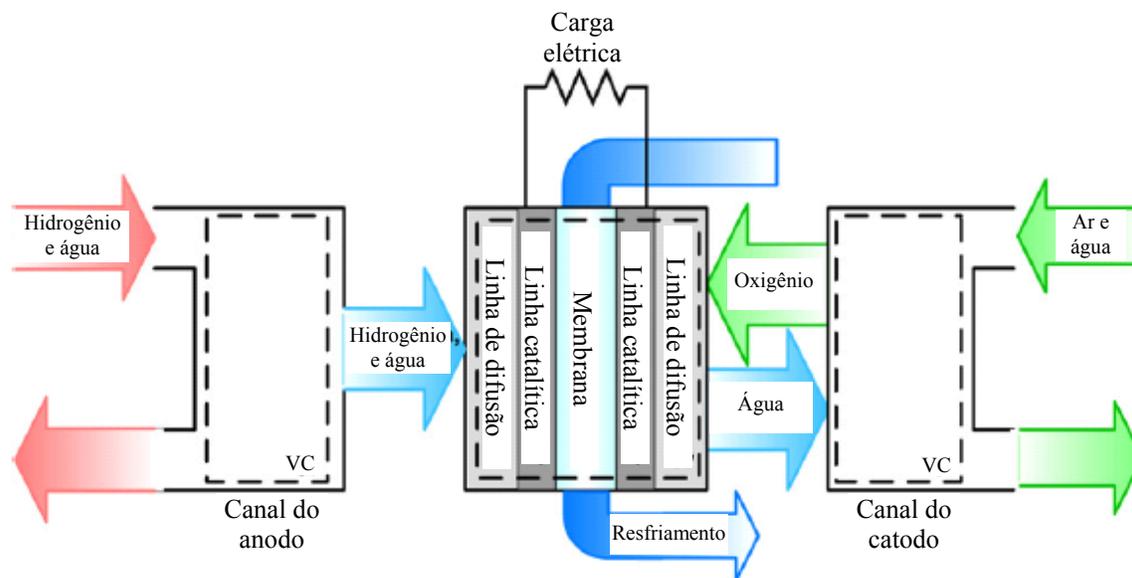


Figura 2.12 – Esquema dos volumes de controle na Pilha a Combustível (CHU *et al.* [41]).

Objetivando evitar a falta de oxigênio e hidrogênio VEGA-LEAL *et al.* [33] desenvolveram um controle que trabalha sobre os valores necessários desses gases, minimizando o consumo no compressor e garantindo o correto desempenho da PaC em um ponto ótimo de operação. Com base no uso de uma válvula regulável para o fluxo de saída do catodo em combinação com a manipulação da voltagem do motor do compressor, FEROLDI *et al.* [30] apresentaram um estudo estacionário e outro dinâmico das vantagens desse método para melhorar a resposta transiente, estabelecendo uma estratégia de controle que regula a tensão da PaC e o excesso do oxigênio no catodo. No estudo e desenvolvimento de um sistema para co-produção de eletricidade e calor de baixa

temperatura, focando a produção de água quente e aquecimento residencial, CAMPANARI *et al.* [23] trabalharam na análise de três diferentes sistemas de pequena escala para a produção de hidrogênio a partir de gás natural e sua integração com uma PaC. Esse trabalho propõe a introdução de uma membrana reformadora que permite a conversão simultânea e a separação seletiva de alta pureza, conforme esquematizado na Figura 2.13.

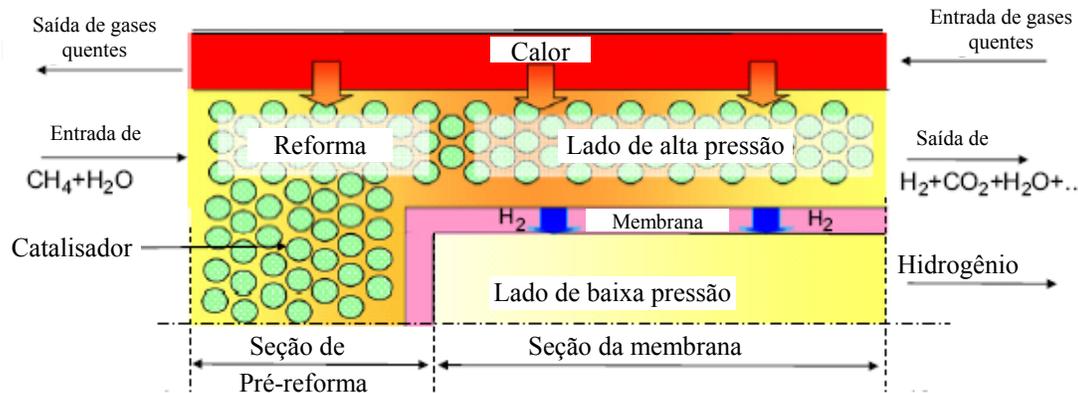


Figura 2.13 – Membrana reformadora de conversão simultânea (CAMPANARI *et al.* [23]).

De acordo com ZHANG *et al.* [54] foram utilizados dois ciclos recuperativos de calor e recirculação de gases de exaustão, aumentando a utilização de combustível e oxigênio, modelando cada um dos componentes do sistema híbrido através das equações de balanço de massa, energia e força. Conforme apresentado por QI *et al.* [59] foram abordadas várias aproximações para produção de hidrogênio no processador de combustível, apresentando os recentes progressos feitos no campo de otimização nos processadores de combustível. Investigando os conceitos de controle para prevenir a carência de hidrogênio, que resulta em diferentes capacidades transientes, GAYNOR *et al.* [46] identificaram métodos para implementar controles avançados voltados para melhorar a capacidade dinâmica de PaC, utilizando uma configuração apresentada na Figura 2.14.

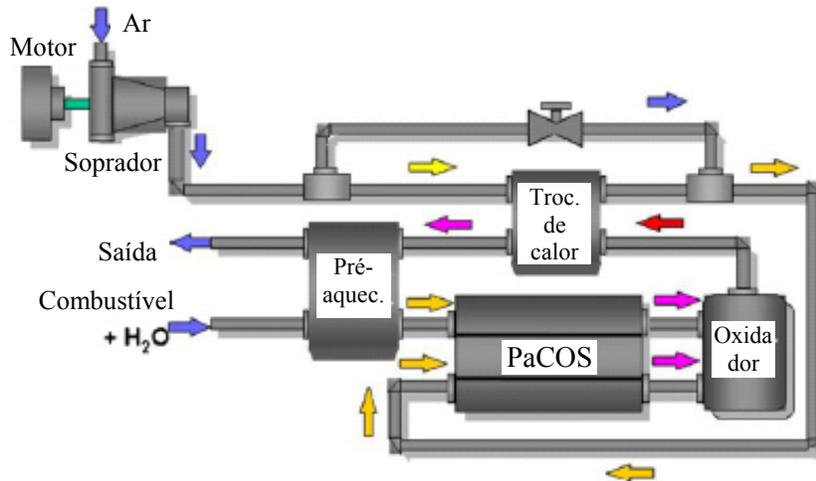


Figura 2.14 – Estrutura de gerenciamento dos gases (GAYNOR *et al.* [46]).

Aplicando um banco de baterias como suporte ao fornecimento de energia elétrica durante as fases de aquecimento e picos de potência, SORRENTINO *et al.* [49] propuseram uma modelagem com metodologia ajustável. A metodologia executa uma análise de controle que permite o armazenamento de energia em fases de baixa demanda de potência. Semelhantemente, UZUNOGLU e ONAR [48] abordaram o comportamento dinâmico de uma planta de potência para PaC, incluindo um banco de baterias e um compensador estático de potência, enfatizando a necessidade de administrar a potência reativa e a capacidade de manter a carga em sistemas de geração distribuída.

Procurando maior flexibilidade, GAYNOR *et al.* [46] projetaram um sistema híbrido teórico integrando uma PaCOS e uma turbina a gás, com o objetivo de melhorar a capacidade transiente que o sistema pode alcançar. Esse trabalho apresenta simulações com eficiência maior que 60% para operações em estado de equilíbrio e eficiência superior a 40% durante regimes transientes. No trabalho de SCHULZE *et al.* [64] foi apresentado o desenvolvimento de um modelo dinâmico de controle que pode manter o fornecimento de tensão apesar de mudanças de carga, com as respostas dinâmicas sendo determinadas a partir de equações diferenciais parciais derivadas das leis de conservação de massa, momento e energia. Esse trabalho estabelece um modelo dinâmico baseado em uma análise tridimensional da PaC e considera a corrente como um distúrbio do sistema. Utilizando um soprador de velocidade variável, MUELLER *et al.* [45] apresentaram duas diferentes estratégias de controle para o modelo dinâmico de um sistema de 5kWe, com o objetivo de

controlar o fluxo de ar para manter a temperatura da PaC, considerando que a potência do soprador não demandará mais que 10% da demanda de potência do sistema.

Com as recentes evoluções nas tecnologias de eletrônica de potência em conjunto com o considerável aumento nas preocupações sobre qualidade de energia, vários trabalhos estão sendo desenvolvidos pelo mundo nessa área. O trabalho realizado por URSUA *et al.* [78] apresentou uma análise do consumo de energia e eficiência comercial do eletrolisador de água alcalino e sua dependência na topologia de fornecimento de potência, utilizando os estágios de potência apresentados na Figura 2.15. Nesse trabalho as diferentes topologias no fornecimento de potência são inicialmente resumidas, analisadas e classificadas em dois grupos, podendo ser baseada em tiristores e transistores. O modelo de simulação incorporou a potência, medições, e estágios de controle, incluindo filtros, intervalos, perdas térmicas nos elementos, e chaveamento nos semicondutores. Uma variedade de cenários foi simulada, tal como velocidade de resposta, rampas de corrente, mudanças de carga e faixas de potência.

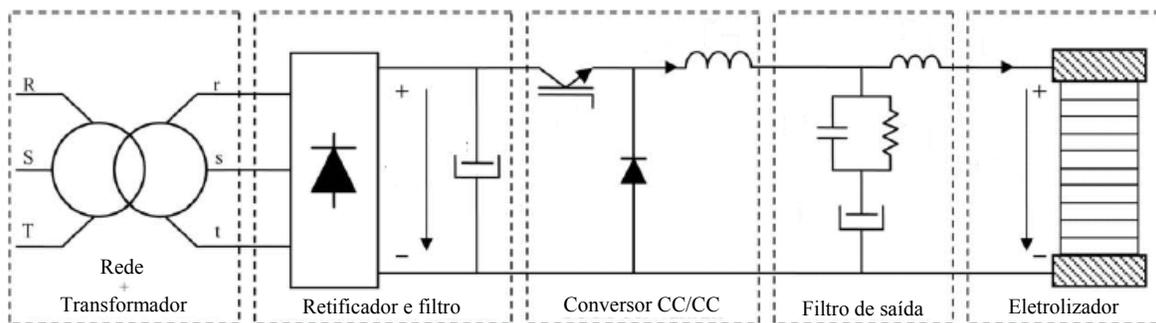


Figura 2.15 – Esquema dos estágios de potência para o eletrolisador (URSUA *et al.* [78]).

Um novo método híbrido para simulação de sistemas de potência equipados com compensadores estáticos voltagem-amperagem reativa foi sugerido por ZHIJUN *et al.* [74]. A contribuição está no fato de que os subsistemas são simulados usando um novo modelo de circuito com largos passos de integração do sinal. Nesse trabalho a precisão e efetividade do novo simulador híbrido foram validadas comparando um pacote comercial de programa transiente eletromagnético. Nessas simulações híbridas os sistemas de potência foram partidos em dois subsistemas de simulação chamados de programa de estabilidade transiente e programa transiente eletromagnético. Os resultados obtidos no

simulador através do fasor dinâmico foram comparados com uma simulação tradicional do programa transiente eletromagnético. A comparação apresentou que o simulador híbrido de fasor dinâmico pode oferecer respostas de formas de onda para tensão e corrente com maior precisão em alta velocidade.

O trabalho desenvolvido por YANG e DENNETIÈRE [73] apresenta uma simulação no domínio do tempo para impedância equivalente em dispositivos de eletrônica de potência. A principal proposta deste estudo foi definir a frequência de controle para impedância equivalente de conversores que são tipicamente utilizados na indústria. As medições e simulações apresentaram que a simplificação de considerar algum dispositivo de eletrônica de potência modelado por uma impedância infinita, no controle da frequência, em alguns casos pode causar um importante erro no nível de controle das ondas.

De acordo com GOUNDEN *et al.* [65] um controle lógico *Fuzzy* foi desenvolvido para interligar um conjunto de painéis fotovoltaicos com a rede através de um inversor trifásico. Nesse controle as variáveis lingüísticas foram selecionadas apropriadamente para modular no ângulo de disparo do inversor que confere a máxima potência. O esquema proposto no controle lógico *Fuzzy* foi construído no *Simulink* do *Matlab* e um microcontrolador PIC foi programado para geração de pulsos de disparos para os tiristores do inversor. O objetivo do trabalho foi alcançar uma faixa de máxima potência solar em painéis fotovoltaicos com inversor de linha comutada, para um sistema conectado a rede trifásica. Na operação, o erro entre a potência atual e a potência de referência foi usado para definir o ângulo de disparo para o inversor.

Uma técnica para reduzir a variação de temperatura nos componentes foi descrita no trabalho de MUSALLAM *et al.* [72]. Um modelo matemático simplificado dos processos térmicos foi avaliado em tempo real para estimar a temperatura do dispositivo. Este princípio é aplicado para o fornecimento de um pulso de potência e para operação de um conversor PWM em muito baixa frequência (0,1Hz) na saída de potência modulada. A representação eletrotérmica simplificada de dispositivos de potência foi desenvolvida e permitiu simulações razoavelmente precisas com redução nos tempos consumidos. O modelo foi implementado em tempo real usando um processador de sinal digital (DSP), conforme indicado na Figura 2.16. A temperatura de junção estimada foi usada dentro de um ciclo de controle da temperatura, para modificar o comportamento de chaveamento. A

segunda aplicação relaciona um controle de temperatura implementado para variar a frequência de PWM e conseqüentemente as perdas de chaveamento, principalmente na resposta a mudanças na potência durante a condução no ciclo de saída de potência. Um modelo térmico para transferência de calor de um MOSFET de potência foi criado considerando a resistência térmica e a capacitância de cada uma das sete camadas físicas dentro do dispositivo. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de replicar o comportamento do dispositivo tanto em estado de equilíbrio quanto em transiente térmico. Nesse trabalho as estimativas de temperatura são derivadas de um modelo de aproximação térmica do dispositivo e são usadas também como um sinal de retorno para o controle de temperatura.

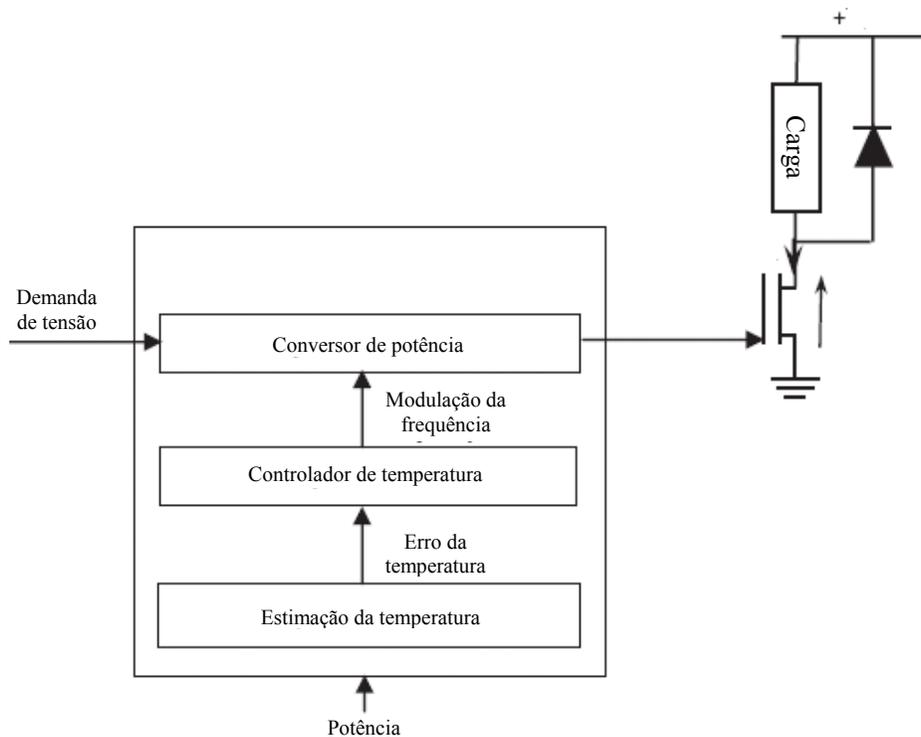


Figura 2.16 – Estratgia de controle térmico no dispositivo de potência (MUSALLAM *et al.* [72]).

Para descrever uma técnica de análise de harmônicos no domínio da frequência para um sistema trifásico CA/CC, GUTIERREZ *et al.* [71] usaram os ângulos de comutacão conhecidos para computar as interações harmônicas pela soluçao seqüencial do estado de variáveis do sistema CA/CC. Nesse trabalho fenômenos elétricos inesperados foram observados nos testes de campo, tal como ressonâncias imprevisíveis em sistemas contendo compensadores estáticos de voltagem-amperagem reativa. Várias metodologias foram

propostas para alcançar a análise de harmônicos no conversor de alta tensão CC no domínio da frequência, porém, somente seqüências positivas de harmônicos foram consideradas na formulação. Baseado no método interativo proposto, esse artigo procurou ampliar a aplicação da metodologia de rede multi-porta, na análise harmônica de conversores trifásicos CA/CC de fase controlada e redes CA. Neste caso, um método para acessar interações harmônicas entre os lados CA e CC de um conversor trifásico foi desenvolvido baseado no conceito de matriz de rede multi-porta. Nesse método o estado do conversor varia e as funções de chaveamento que representam o estado dos conversores são quebradas em séries de Fourier, em ordem para construir um modelo de matriz harmônica. Com essa estrutura, componentes de uma planta de potência contendo sistemas CA e CC podem ser incorporados em um modelo de matriz harmônica.

Vários experimentos e exemplos de simulação para conversores de eletrônica de potência foram discutidos por IANNELLI *et al.* [75], mostrando que a principal contribuição deste artigo foi apresentada quando são violadas certas condições no sinal levado aos conversores de potência. Essas alterações nas condições podem provocar falhas na previsão do correto comportamento do sistema. Foram apresentados quatro tipos comuns de conversores de potência chaveados, considerando conversores de potência chaveada compostos de componentes elétricos passivos lineares (resistores, indutores, capacitores), fontes independentes de tensão e corrente, diodos ideais, transistores e tiristores. Simulações e experimentos suportaram os resultados teóricos e apresentaram a importância de entender as limitações da teoria na prática dessa área.

Um trabalho bastante promissor aborda o comportamento dinâmico de uma planta de potência baseada em PaCOS, incluindo um banco de baterias e um compensador estático de voltagem-amperagem reativa, para o controle de fluxos de potência ativa e reativa, de acordo com UZUNOGLU e ONAR [48]. A necessidade de administração da potência reativa, assim como a capacidade de carga para geração distribuída foi enfatizada, descrevendo as estratégias de controle para o gerenciamento de potência. No sistema proposto o gerenciamento da potência ativa é alcançado através da planta de potência PaCOS, com o auxílio do banco de baterias. Já o gerenciamento da potência reativa é alcançado usando um compensador estático de voltagem-amperagem reativa, que previne as interações de carga no bloco CC. Todos os modelos dinâmicos e sistema de controle

foram integrados para executar a simulação do esquema proposto usando o *Simulink* do *Matlab*. A estratégia proposta para o controle da potência ativa e reativa foi testada sobre perfis de carga pré-definidos. O banco de baterias foi controlado através de um conversor CC/CA, para prevenir inadequações e faixa de atraso na potência. Nesse trabalho foi constatado que usando o compensador estático de voltagem-amperagem reativo, com essa configuração, foi possível prevenir as interações da potência reativa sobre o bloco CC, eliminando as oscilações de potência reativa entre a fonte e a carga.

Conforme apresentado por DAHIDAH *et al.* [70], foi desenvolvida uma ótima solução para eliminação seletiva de harmônicos com modulação de largura de pulso, que é uma técnica ajustável para inversores de alta potência usada em aplicações de frequência constante. O trabalho discutiu um eficiente código de Algoritmo Genético híbrido que reduz significativamente o peso computacional, resultando em uma rápida convergência de soluções. As considerações teóricas abordadas nesse artigo foram verificadas experimentalmente e através de simulações, em um protótipo de baixa potência. Esse trabalho mostrou que a aplicação da tecnologia de redes neurais foi adaptada para construir em um microprocessador simples o menor PWM que defina um ótimo ângulo de chaveamento para inversores. O objetivo deste trabalho foi introduzir uma técnica de minimização com um código de Algoritmo Genético híbrido, de modo a reduzir o peso computacional associado às equações não-lineares. Diferentes casos foram investigados, incluindo sistemas monofásicos e trifásicos, comparando a evolução em termos de tempos computacionais entre os métodos convencionais e o algoritmo proposto. Um protótipo de um inversor monofásico também foi construído e testado para todos os casos e foi alcançado um bom resultado entre a simulação e os resultados experimentais.

No trabalho de GAILLARD *et al.* [77] foi apresentada uma aproximação para geração simultânea de potência e redução nos harmônicos de corrente, com a utilização da velocidade variável do sistema de conversão eólica, em um duplo gerador de indução. A nova estratégia foi proposta para encontrar simultaneamente uma fonte de potência ativa e reativa com capacidade de filtragem ativa. Esse controle é alcançado usando um modulador trifásico com controle de histerese de corrente, procurando satisfazer uma frequência fixa de chaveamento para os IGBTs. O sistema de conversão de energia do vento é simultaneamente capaz de capturar a máxima energia de um ventilador flutuante,

controlando a potência ativa e reativa e compensando o conjunto de harmônicos de corrente. Para assegurar alta performance de filtragem foi estudado um novo isolador harmônico, baseado na alta seletividade de filtragem. Também foi examinada a performance para compensação total ou seletiva de harmônicos, tanto em condições de equilíbrio como transientes.

O trabalho apresentado por BINA e PASHAJAVID [69] examina várias condições efetivas no projeto de um tipo de filtro passivo. A principal vantagem deste estudo foi na redução da perda de potência em filtros passivos, relacionada com a redução das taxas de chaveamento do conversor e com a simplicidade do algoritmo de projeto. O trabalho também contribuiu com uma análise compreensiva do projeto de um filtro passivo, que é modulado usando técnicas de chaveamento com frequência variável. Diferentes aspectos de projeto para um filtro LCL foram discutidos e um processo de projeto foi apresentado para um filtro passivo LCL. Nesse processo vários pontos e características foram descritos para definir indutâncias, capacitância e resistência. Simulações indicaram que os parâmetros de projeto para filtros LCL afetam consideravelmente a eficiência de filtros passivos e diminui a previsão de potência nas chaves.

Um sistema transferidor de potência de acoplamento indutivo (ICPT) com uma grande abertura de ar foi desenvolvido e construído para um veículo elétrico a baterias, conforme descrito por GUTIERREZ *et al.* [71]. Este estudo foi voltado para definição de processos de implementação de protótipos, validando os resultados teóricos e analisando a influência no desvio da frequência com relação à frequência de ressonância. Para melhorar o comportamento do sistema ICPT vários estudos foram considerados para determinar a melhor maneira de compensação do fator de potência. Os diferentes estudos consideraram uma grande distância entre o primário e o secundário, variando em torno de 5 cm. Este trabalho apresentou um processo para determinar a configuração ótima de um sistema ICPT compensado, o qual foi validado pelos resultados experimentais obtidos em um protótipo de 5kW.

No trabalho proposto por AOUZELLAG *et al.* [76] uma rede de controle para fluxo de potência de um gerador eólico com velocidade variável foi investigada. Esse sistema de gerador eólico consiste de um gerador indutivo duplo conectado a uma rede, que é associada a um sistema armazenador de energia *flywheel*, conforme esquematizado na

Figura 2.17. Inicialmente foram analisadas a modelagem e a simulação de uma turbina eólica de velocidade variável, usando um gerador indutivo duplo, descrevendo a configuração do sistema de armazenamento de energia *flywheel*. Nesse sistema a produção extra de energia elétrica é convertida em energia cinética e armazenada sobre esta forma no *flywheel*. Um dos objetivos foi constituir sistemas ajustáveis para melhorar a qualidade na produção de potência elétrica. O princípio operacional do modelo proposto para o gerador foi demonstrado através de regimes transientes e condições de equilíbrio.

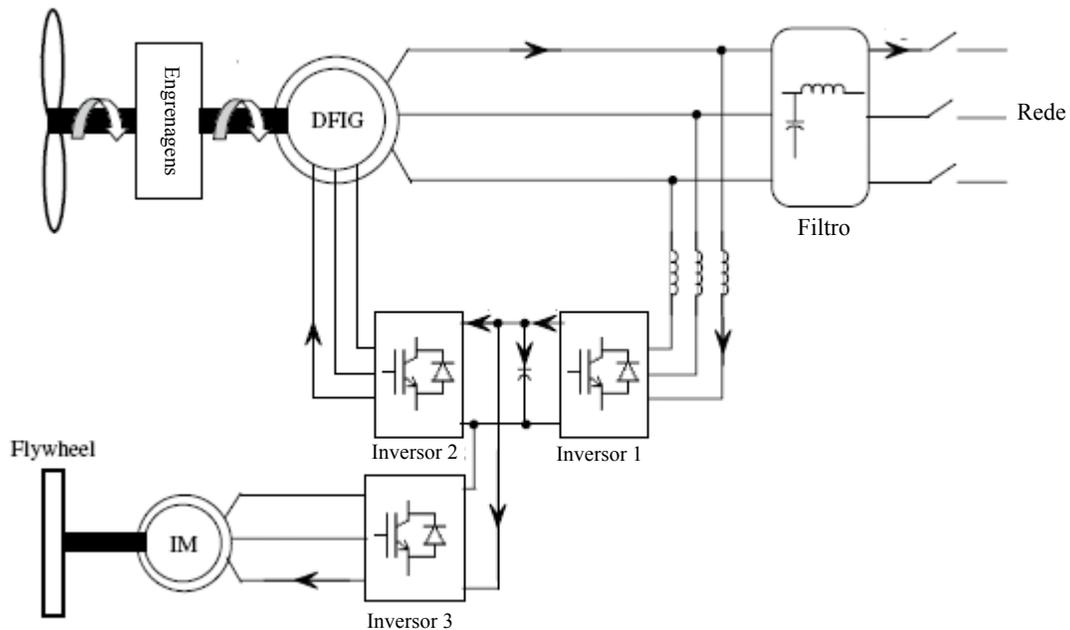


Figura 2.17 – Esquema da rede de controle para o fluxo de potência (AOUZELLAG *et al.* [76]).

Conforme descrito por ZHANG *et al.* [7], um conceito e princípio de gerenciamento ativo foram introduzidos e vários índices foram propostos para avaliar impactos técnicos e econômicos do gerenciamento ativo em uma rede de geração distribuída. Três métodos de controle da tensão ativa foram abordados e o modelo matemático foi introduzido. As expressões de índices sobre impactos técnicos e econômicos foram apresentadas em diferentes cenários e considerações. Três tecnologias de geração distribuída foram estudadas, assim como a utilização de diferentes sistemas de controle. Os resultados apresentaram que a aplicação de gerenciamento ativo pode reduzir as perdas e melhorar efetivamente o perfil da tensão. Também foi observado que para determinar precisamente

os efeitos das variações na saída da geração distribuída são necessárias simulações sobre um extenso período de tempo.

3- Proposta do trabalho

O objetivo do trabalho é estabelecer uma pesquisa consistente sobre conceitos importantes relacionados com Pilhas a Combustível (PaC), Balanço de Planta (BdP) e eletrônica de potência, trabalhando a proposição de soluções em uma configuração de gerenciamento da potência produzida. Unindo os conceitos pesquisados com as soluções desenvolvidas, o trabalho testa uma nova proposta de estratégia de controle para o balanço energético de uma planta de geração de potência baseada em PaC, com a previsão de demanda compatível com uma aplicação residencial. Para comprovar a eficácia das soluções propostas foram confeccionados dois protótipos, que sintetizam as duas idéias principais do trabalho.

Dentro dos objetivos do trabalho está a aplicação estratégica de um pequeno banco de baterias, atuando como fonte complementar de potência para absorver processos transientes na demanda de potência. A aplicação desse banco de baterias tem o objetivo de fazer com que a PaC fique operando em regime estacionário, mesmo em condições de solicitação dinâmica de potência. As baterias atuam suprindo as variações na demanda de potência, obedecendo a seqüência de controle apresentada na Figura 3.1. Para permitir o funcionamento em regime estacionário foi aplicado o método de otimização baseado em algoritmos genéticos. Esse método tem o objetivo complementar a estratégia de controle determinando o ponto ótimo de operação estacionária, através das equações que modelam os vários dispositivos do BdP em uma Pilha a Combustível de Óxido Sólido (PaCOS).

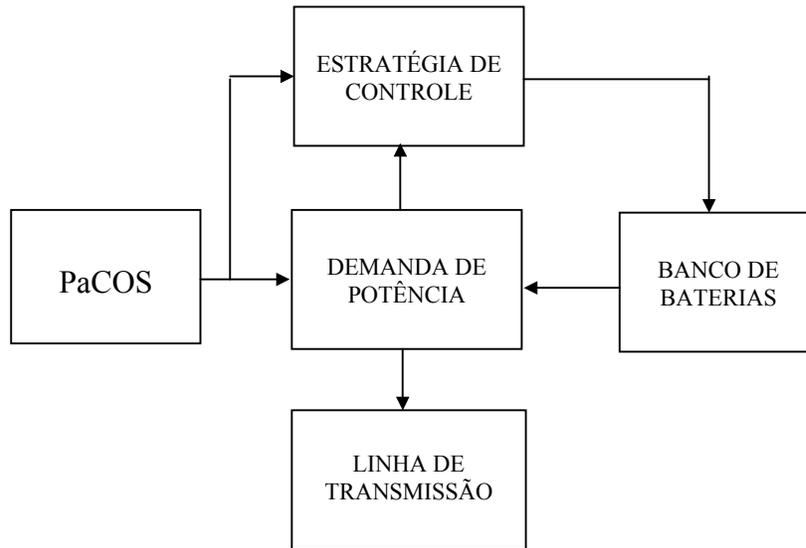


Figura 3.1 – Seqüência de controle proposta.

Para avaliar as idéias e soluções propostas no trabalho foram criados programas e circuitos de simulação, gerando gráficos com o objetivo de assegurar a melhoria no comportamento dinâmico e eficiência no BdP de PaC. A estratégia de controle também procura aumentar a vida útil dos componentes da PaC, principalmente dos eletrodos e eletrólito, que ainda são as partes mais caras e mais vulneráveis aos desajustes nos parâmetros de operação em uma PaC.

Procurando ilustrar a estrutura de dispositivos e processos envolvidos no BdP proposto nesse trabalho, foi confeccionada a Figura 3.2, que apresenta a configuração básica de gerenciamento do BdP. Ressaltando que, a entrada de combustível prevê dois caminhos opcionais, onde um contempla o processo de reforma externa, porém, o objetivo do projeto é utilizar a reforma interna ou oxidação direta, que são processos mais eficientes.

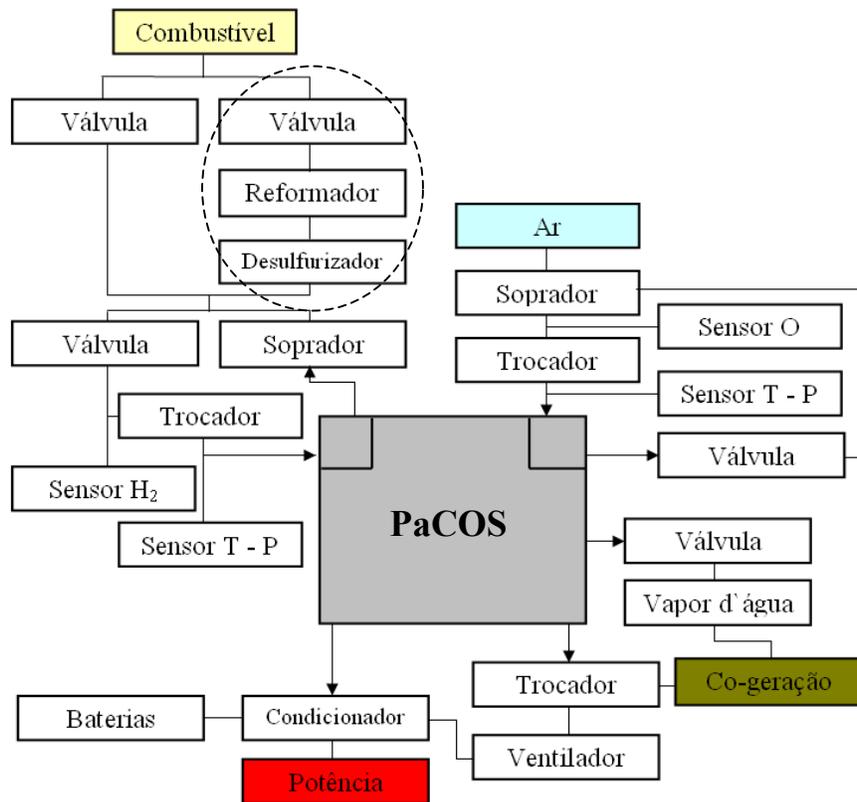


Figura 3.2 – Configuração básica de componentes no gerenciamento do BdP.

Buscando aproveitar ao máximo o calor gerado, a configuração para o BdP proposto direciona parte do calor gerado e todo o vapor d'água para co-geração com objetivo residencial. Para a conversão de corrente CC para CA, tendo em vista a perspectiva de aplicação residencial, a configuração de gerenciamento foi estruturada com um condicionador de potência na saída. Além da conversão de corrente, o condicionador é responsável por administrar a interação do banco de baterias no processo, assim como alimentar condicionalmente o ventilador utilizado para co-geração, de acordo os comandos fornecidos pela estratégia de controle.

O plano de operação idealizado nesse trabalho procura manter a PaCOS operando no ponto ótimo de funcionamento, o qual está relacionado com a região de eficiência máxima para potência definida. Essa configuração opera suprindo as variações de demanda com o banco de baterias, o que significa complementar a potência de saída descarregando as baterias ou consumir o excedente carregando as baterias. Porém, em caso de baixa

demanda, com o banco de baterias totalmente carregado, foi previsto um processo de recirculação parcial dos reagentes, transferindo o ponto de operação ótimo para um nível de potência mais baixo, mantendo o complemento proporcionado pelo banco de baterias. Neste caso, o sistema opera da mesma maneira, porém, agora com a PaCOS em um valor mais baixo de potência.

Ao manter a PaCOS trabalhando em um ponto de operação estacionário e balanceando as variações de demanda através de um banco de baterias, são obtidos os benefícios relacionados com uma maior eficiência da PaCOS, uma vez que ela está operando em seu ponto ótimo e sem a necessidade de complicados ajustes de parâmetros. Também existe a oportunidade de utilização das baterias nos processos de partida da PaCOS e considerável ampliação na resposta dinâmica do sistema pilha-bateria em relação à demanda de potência, preservando a PaCOS das solicitações dinâmicas de potência. Com esse processo a vida útil da PaCOS é ampliada, tendo em vista que os seus componentes operam na sua melhor condição e que os pontos críticos e desajustes de operação não são empregados no gerenciamento da PaCOS.

O trabalho apresentado também tem como objetivo propor e testar um conversor de potência contendo duas partes fundamentais, representadas por um elevador de tensão e um inversor. Procurando minimizar a necessidade de filtros e estabelecer um circuito mais compacto e eficiente, foi desenvolvida uma metodologia focada no aproveitamento dos processos transientes de carga e descarga dos componentes armazenadores de energia, para construção da onda senoidal de saída do conversor. A topologia de circuito proposta para esse conversor também busca permitir a utilização de PaCOS no fornecimento de energia para aplicação residencial, dentro de um conceito de geração distribuída. A configuração de conversão da potência produzida é apresentada na Figura 3.3, que visa adequar a tensão da PaCOS para entrada no inversor, de modo a fornecer a correta potência na saída do conversor.

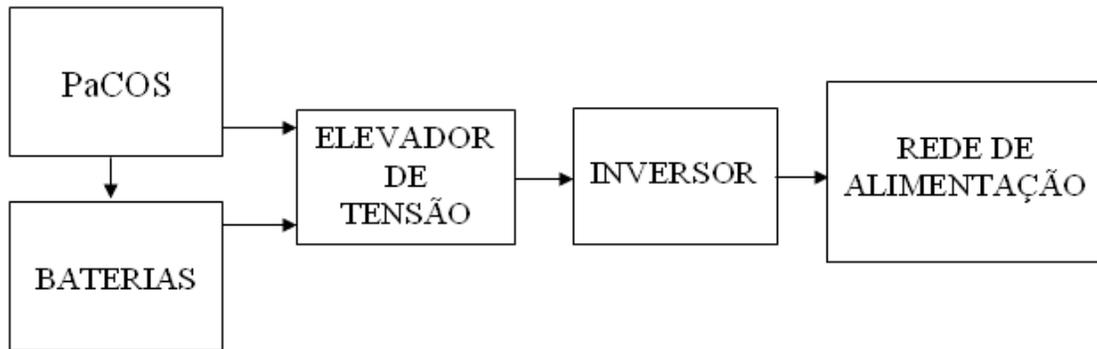


Figura 3.3 – Esquema da configuração para o sistema proposto.

Para permitir o alcance da configuração proposta e o entendimento dos conceitos necessários, o trabalho foi iniciado com uma abordagem dos conhecimentos e conceitos envolvidos no desenvolvimento, seguidos por uma descrição de trabalhos realizados com temas ligados a essa área de pesquisa, por meio da revisão bibliográfica. Depois foi apresentada a modelagem dos fenômenos que ocorrem na PaCOS e na arquitetura proposta para o conversor, descrevendo inicialmente o elevador de tensão e posteriormente o inversor de potência. Em seguida foi apresentada a definição e aplicação de Algoritmos Genéticos no sistema e a estrutura do processo de simulação do conversor, mostrando os resultados obtidos. E finalizando o trabalho foram apresentados os protótipos construídos, seguidos pelas medições, conclusões e avaliações obtidas no desenvolvimento proposto.

4- Modelagem

4.1- Análise eletroquímica

Muitos pesquisadores têm se empenhado desenvolvendo e usando os modelos de estado de equilíbrio para PaCOS, procurando ajustar condições dinâmicas de operação. Esses modelos são baseados em relações entre variáveis físicas através das equações de Nernst, de difusão de gases, concentração e polarização. Embora existam muitas investigações em vários aspectos de modelagem matemática ligada a PaCOS, a grande maioria delas está baseada no desempenho estacionário. Esse trabalho apresenta uma modelagem que associa as equações de estado de equilíbrio em uma nova configuração de operação, que é baseada em uma estratégia de controle que procura aproximar os pontos de resposta dinâmica a partir de modelos estacionários. A partir daí, foram definidas as equações necessárias para o processo de simulação, considerando uma análise unidimensional da PaC e procurando conciliar a precisão do modelo e o peso de processamento computacional.

A metodologia empregada procura suportar a demanda de potência e suas variações com o auxílio de um banco de baterias e alternativamente o controle procura atuar sobre o fluxo e recirculação parcial dos gases reagentes. A partir de uma variação na demanda de potência o controle atuará empregando o banco de baterias e caso necessário interferirá com alteração na concentração ou fluxo dos reagentes, gerenciando a operação do equipamento com base nas equações descritas a seguir.

Inicialmente foi considerada a diferença de potencial da PaC (E), que é conhecida como potencial padrão de Nernst, apresentada na Equação 4.1.5, que é obtida ao considerar a conversão do potencial químico dos fluidos em potencial elétrico. Esse cálculo é iniciado com a integração do termo entálpico e entrópico até a temperatura de operação da PaC, conforme descrito por SARRUF [79].

$$\Delta H_{(T)} = \Delta H_{298,15K} + \int_{298,15}^T C_p \cdot dT \quad (4.1.1)$$

$$\Delta S_{(T)} = \Delta S_{298,15K} + \int_{298,15}^T \frac{C_p}{T} .dT \quad (4.1.2)$$

onde H é entalpia, S a entropia, T a temperatura do processo e C_p o calor específico a pressão constante do fluido.

Com base no trabalho reversível das reações, de acordo com a primeira e segunda lei da termodinâmica, é associada a variação da energia livre de Gibbs.

$$\Delta G_{(T)} = \Delta H_{(T)} - T\Delta S_{(T)} \quad (4.1.3)$$

A conversão da unidade de potencial químico para potencial elétrico é viabilizada com a utilização da constante de Faraday (F).

$$E = -\frac{\Delta G_{(T)}}{n.F} \quad (4.1.4)$$

Ao considerar as pressões parciais dos gases envolvidos na reação, é obtida a Equação 4.1.5, descrita por SORRENTINO *et al.* [49].

$$E = -\frac{\Delta G_0 .T}{n.F} - \frac{R.T}{n.F} .\ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}\right) \quad (4.1.5)$$

onde n corresponde ao número de elétrons transferidos, R a constante universal dos gases, G_0 a energia livre de Gibbs, P_{H_2O} pressão parcial da água, P_{H_2} pressão parcial do hidrogênio e P_{O_2} a pressão parcial do oxigênio.

Ao considerar as perdas existentes em um processo de produção de energia através de PaC, a voltagem disponível pode ser expressa de acordo com a Equação 4.1.6.

$$V = E - V_A - V_O - V_C \quad (4.1.6)$$

onde V expressa a tensão total produzida na PaC, V_A a perda por ativação, V_O perda ôhmica e V_C a perda por concentração.

Para quantificar as perdas por ativação, ôhmicas e por concentração, foram aplicadas as Equações 4.1.7, 4.1.8, e 4.1.9, respectivamente, apresentadas por KANG *et al.* [44].

$$V_A = \frac{2.R.T}{n.F} . \sinh^{-1} \left(\frac{J}{2.J_0} \right) \quad (4.1.7)$$

$$V_O = J.R_O \quad (4.1.8)$$

$$V_C = -\frac{R.T}{F} . \ln \left(1 - \frac{J}{J_L} \right) \quad (4.1.9)$$

onde J relaciona a densidade de corrente, J_0 a densidade de corrente inicial, J_L a densidade de corrente limite e R_O a resistência ôhmica do conjunto catodo-eletrólito-anodo.

As perdas por ativação estão relacionadas com a energia necessária para dar início às reações químicas do processo. Já as perdas ôhmicas são geradas pela resistência à passagem dos elétrons nos eletrodos, assim como dos condutores e conectores de ligação da PaC. As perdas por concentração estão relacionadas com a redução dos reagentes ativos no fluxo dos gases que passam pela PaC.

Para estimar o fluxo de corrente gerado na PaC foi aplicada a Equação 4.1.10, descrita em GAYNOR *et al.* [46], que expressa a corrente máxima (I_{max}) do equipamento.

$$I_{max} = \frac{2.F.(1 - x_{H_2}).N_P}{A} \quad (4.1.10)$$

onde x_{H_2} relaciona a concentração de hidrogênio no gás combustível, N_P o fluxo de combustível na PaC e A a área do eletrodo.

A utilização de combustível (u) é uma das variáveis mais importantes de alteração do desempenho na PaC, que pode ser calculada através da Equação 4.1.11, descrita em GAYNOR *et al.* [46].

$$u = \frac{N_0 \cdot I_P}{2 \cdot N_{H_2} \cdot F} \quad (4.1.11)$$

onde N_0 quantifica o número de células unitárias, I_P a corrente na PaC e N_{H_2} o fluxo de hidrogênio na PaC.

O fluxo de combustível resultante da utilização desejável (N_{ref}) pode ser calculado e controlado através da Equação 4.1.12, apresentada por GAYNOR *et al.* [46].

$$N_{ref} = \frac{n \cdot A}{2 \cdot F \cdot u} \quad (4.1.12)$$

A estimativa das pressões parciais nos reagentes (P_P) foi alcançada com base na Equação 4.1.13, descrita por UZUNOGLU e ONAR [48].

$$P_P = \frac{1/K_{H_2}}{1 + s \cdot \tau_{H_2}} \cdot (N_{H_2} - 2 \cdot K_r \cdot I_P) \quad (4.1.13)$$

onde K_{H_2} é a constante da válvula de hidrogênio, K_r a constante do modelo e τ_{H_2} a constante de tempo do hidrogênio.

4.2- Análise térmica

Para avaliar termicamente o processo, é observado que alguma parte da energia produzida pela reação média não pode ser convertida em energia elétrica, a qual é expressa na forma de calor. Como resultado foi gerada a oportunidade de aproveitamento desse calor através de dispositivos de co-geração. Para quantificar a energia térmica disponível para

dissipação na PaC (Q_C) foi utilizado o balanço termodinâmico de energia descrito na Equação 4.2.1, apresentada por ADZAKPA *et al.* [24].

$$Q_C = Q_H - Q_E + Q_S \quad (4.2.1)$$

onde Q_S representa o calor sensível dos gases e Q_H a energia térmica fornecida a PaC na reação dos gases, que é dada pela Equação 4.2.2.

$$Q_H = -\frac{\Delta H_R}{2.F} \cdot I_P \quad (4.2.2)$$

onde H_R é a entalpia da reação.

A energia térmica relacionada a potência elétrica produzida na PaC (Q_E) é descrita conforme a Equação 4.2.3.

$$Q_E = V \cdot I_P \quad (4.2.3)$$

Ao considerar os processos de administração e aproveitamento de calor propostos na estratégia de controle, foi utilizada a Equação 4.2.4 para estimar a energia térmica transmitida pela convecção forçada do ar através das superfícies da PaC (E_T).

$$E_T = h \cdot (T_P - T_A) \quad (4.2.4)$$

onde h representa o coeficiente de convecção, T_A a temperatura do ar e T_P a temperatura da PaC.

4.3- Análise eletromecânica

Em uma avaliação eletromecânica de uma planta de potência baseada em PaC são considerados os elementos de resposta mecânica e consumo elétrico, como compressores,

sopradores, válvulas, misturadores, entre outros. Como grande parte da potência consumida no sistema auxiliar da PaCOS está relacionada com os compressores e sopradores e o sistema proposto foi idealizado para ter apenas sopradores e válvulas como dispositivos eletromecânicos. Na análise foi considerada como modelável apenas a potência consumida nos sopradores e o consumo nas válvulas foi estimado como 15% da potência dos sopradores, por serem consideradas componentes de baixo consumo que dependem da configuração do sistema.

Para avaliação eletromecânica do processo, a potência consumida no soprador (W_S) foi calculada com base na Equação 4.3.1, descrita por FEROLDI *et al.* [30].

$$W_S = \frac{C_p \cdot T_A}{\eta_{CP}} \cdot \left[\left(\frac{P_S}{P_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \cdot N_{CP} \quad (4.3.1)$$

onde C_p representa o calor específico do ar, η_{CP} o rendimento do soprador, γ a taxa de aquecimento específico do ar, P_S a pressão na saída do soprador, P_A a pressão ambiente e N_{CP} o fluxo de ar no soprador.

A eficiência do sistema de geração (η_s) foi obtida através da Equação 4.3.2, apresentada por FEROLDI *et al.* [30].

$$\eta_s = \frac{V}{1,25} \cdot \frac{(P_p - P_A)}{P_p} \quad (4.3.2)$$

onde P_p expressa a pressão interna da PaCOS e P_A a pressão ambiente.

Como um indicador que apresenta a descarga e carregamento do banco de baterias, foi utilizada a quantificação do estado de carga das baterias (EdC) através da Equação 4.3.3, apresentada por UZUNOGLU e ONAR [48], servindo como parâmetro para gerenciamento e integração das baterias no processo.

$$EdC = \frac{Q_0 \pm \int I_B dt}{Q_N} \quad (4.3.3)$$

Onde I_B é a corrente na bateria, Q_0 a carga inicial e Q_N a taxa de ampère-hora.

Procurando manter o sistema compacto e aumentar consideravelmente a capacidade dinâmica de resposta, mesmo com a introdução das baterias, foi prevista a utilização de baterias de íon de lítio, com uma energia disponível de aproximadamente 250Wh, o que possibilita suportar quase meia hora em processo contínuo de carregamento ou descarga. Essas baterias representam uma das tecnologias mais avançadas em termos de armazenamento de carga, além de estar com altas e promissoras perspectivas de aperfeiçoamento da tecnologia [80 - 82]. Basicamente elas se destacam por sua alta capacidade de carga e descarga, permitindo descargas profundas e processos de carregamento em pequenos intervalos de tempo. Elas também possuem uma baixa relação peso-potência, configurando baterias compactas e leves, em relação às baterias convencionais. Desenvolvimentos recentes nessa área ampliaram consideravelmente a vida útil do dispositivo, assegurando confiabilidade e um aumento na quantidade de ciclos de carga e descarga [83, 84].

4.4- Análise do conversor de potência

O conversor proposto possui uma configuração isolada da rede elétrica convencional (fornecida pela concessionária de distribuição), permitindo que o consumidor possa produzir sua própria energia elétrica, como parte de uma tendência crescente no mundo, que é a geração distribuída. Essa configuração representa uma grande economia em termos de estrutura de distribuição de energia elétrica, pois como normalmente é instalada próxima ao consumidor, evita a necessidade de construção de longas linhas de transmissão. Essa característica resulta em uma considerável redução nos gastos operacionais de uma linha de transmissão, representados principalmente pelos gastos com manutenção e proteção de um sistema de distribuição elétrica.

A estrutura utilizada na conversão de potência é composta pela associação de dois conversores básicos, representados por um conversor elevador de tensão (*Boost*) e um inversor de frequência monofásico. O conversor proposto se diferencia pelo resultado

obtido na construção da onda através do método de operação aplicado nesses dois conversores. O processo de operação do conversor proposto é baseado na geração de pulsos de tensão e corrente, na frequência de operação, por meio do elevador de tensão, formando a metade da onda pretendida. Em seguida o inversor de frequência proporciona a construção da onda senoidal, com a inversão da outra metade da onda produzida pelo elevador de tensão, formando a parcela negativa da onda. Para que esse processo de operação possa ocorrer de forma adequada, foi definido um sincronismo entre a frequência de chaveamento do elevador de tensão e a frequência do inversor.

O conversor aplicado nesse trabalho possui uma configuração de baixa frequência e pode ser classificado em uma posição muito próxima a do conversor de onda quadrada, em termos de configuração e parâmetros operacionais. Porém, diferentemente do conversor de onda quadrada, o conversor proposto procura produzir uma onda próxima de uma senóide na saída do inversor, evitando a necessidade dos filtros existentes no conversor de onda quadrada. Considerando os métodos utilizados na construção da onda, o conversor proposto pode ser comparado ao conversor ressonante, considerando que ambos promovem a construção da onda aproveitando o pulso de armazenamento de energia nos componentes passivos do circuito, utilizando o chaveamento no ponto de tensão nula, conforme descrito por LUO e YE [12]. Porém, diferentemente do conversor ressonante, que utiliza a passagem espontânea de uma corrente por um indutor seguido de um capacitor (em uma configuração de ressonância), o conversor proposto constrói a onda através de duas etapas distintas, inicialmente acionando isoladamente o indutor, para o acúmulo de energia, seguido pela descarga dessa energia sobre o capacitor e a carga.

Como os processos de carga e descarga do indutor no conversor proposto são proporcionados por um transistor, que é acionado pelo circuito de controle, esse conversor possui um nível de flexibilidade no ajuste da onda e definição da frequência. Quando o indutor é acionado isoladamente para acumular energia, todo o restante do circuito deixa de receber energia da fonte, permitindo explorar a capacidade máxima do indutor, o que permite reduzir consideravelmente a dimensão desse componente. No passo seguinte o transistor é desligado e o indutor descarrega um pulso de tensão no capacitor e na carga, que atuam como um circuito amortecedor, formando a outra parcela da onda. Outra característica importante nesse conversor é a associação sincronizada dos processos de

elevação e inversão da tensão, tendo já como resultado um sinal bem próximo da onda senoidal.

Para descrever o funcionamento básico da primeira parcela do conversor proposto, inicialmente pode ser dito que o elevador de tensão (*Boost*) utilizado tem sua operação iniciada com a ligação do transistor, que faz com que toda a tensão da fonte seja aplicada no indutor. Com isso, o indutor acumula energia, com a corrente que passa por ele crescendo linearmente, com o diodo reversamente polarizado e com a carga sendo alimentada apenas pelo capacitor. Nesse momento o transistor é desligado e toda a energia acumulada no indutor é transferida para saída, por meio da condução do diodo, recarregando o capacitor e alimentando a carga. Quando esse ciclo é reiniciado ainda existe uma corrente residual no indutor, caracterizando o modo contínuo de operação. A configuração de circuito utilizada pode ser observada na Figura 4.1.

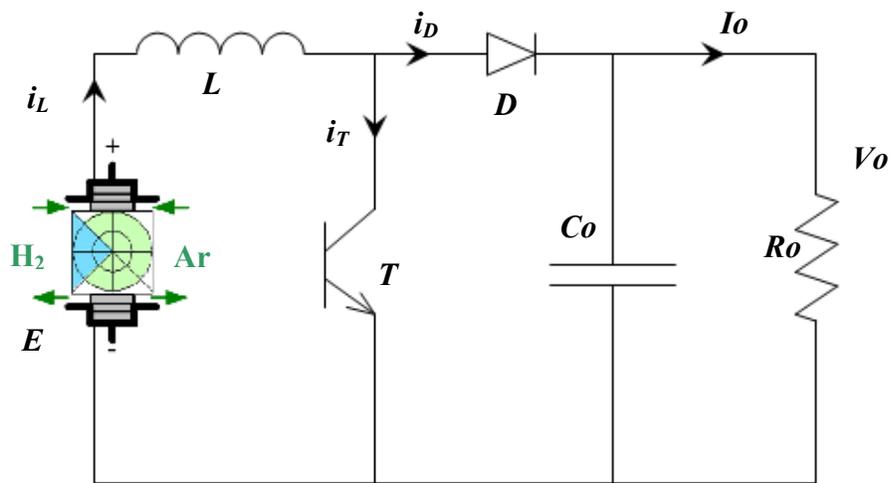


Figura 4.1 – Circuito do conversor elevador de tensão.

A primeira consideração a ser feita nesse tipo de conversor é com relação aos valores de tensão e corrente no indutor associado ao circuito, que podem ser obtidos por meio das Equações 4.4.1 e 4.4.2, descritas por MOHAN *et al.* [85].

$$v_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (4.4.1)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\tau} v_L \cdot d\tau \quad (4.4.2)$$

onde v_L expressa a tensão no indutor, i_L a corrente no indutor e L a indutância.

Por analogia, uma análise similar é aplicada para o capacitor associado ao circuito, que permite determinar a corrente e a tensão por meio das seguintes equações:

$$i_C = C \cdot \frac{dv_C}{dt} \quad (4.4.3)$$

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_{\tau} i_C \cdot d\tau \quad (4.4.4)$$

onde v_C expressa a tensão no capacitor, i_C a corrente no capacitor e C a capacitância.

Para determinação das relações de potência em condições ideais (sem perda de potência), as condições de entrada e saída do circuito podem ser alcançadas conforme apresentado na Equação 4.4.5 descrita por MOHAN *et al.* [85].

$$V_o \cdot I_o = V_i \cdot I_i \quad (4.4.5)$$

onde V_o corresponde à tensão média de saída, V_i à tensão média de entrada, I_o à corrente média de saída e I_i à corrente média de entrada.

Ao considerar os períodos de desligamento da chave na formação da tensão média de saída, é obtida a relação descrita na Equação 4.4.6, apresentada por AHMED [86].

$$V_o = \frac{T_P}{T_{OFF}} \cdot V_i \quad (4.4.6)$$

onde T_{OFF} define o tempo de chave desligada e T_P o período da onda.

Como definição de parâmetro para análise do sistema, é estabelecida a idéia de ciclo de trabalho (d), que é a relação entre o tempo em que a chave fica ligada e o período da

onda, conforme mostrado na Equação 4.4.7, descrita por MOHAN *et al.* [85], onde T_{ON} define o tempo de chave ligada.

$$d = \frac{T_{ON}}{T_P} \quad (4.4.7)$$

Para especificar a tensão e corrente considerando as características dinâmicas na conversão da potência, são utilizadas as seguintes equações, descrita por MOHAN *et al.* [85]:

$$v_{EL} = \left(1 - \frac{2 \cdot L \cdot f \cdot i_L}{V_i \cdot d}\right) (V_i - v_0) \quad (4.4.8)$$

$$i_{EL} = \frac{d^2}{2 \cdot L \cdot f} V_i - d \cdot i_L \quad (4.4.9)$$

onde v_{EL} e i_{EL} representam a tensão e corrente no elevador de tensão e f a frequência de chaveamento.

No dimensionamento dos componentes (capacitor e indutor) foram utilizadas as Equações 4.4.10 e 4.4.11, considerando o limite entre o modo contínuo e descontínuo de condução, descritas por MOHAN *et al.* [85].

$$L_{min} = \frac{V_i \cdot d \cdot (1 - d) \cdot T_P}{2 \cdot I_{0min}} \quad (4.4.10)$$

$$C_0 = \frac{I_{0max} \cdot d \cdot T_P}{\Delta V_0} \quad (4.4.11)$$

O processo de construção da onda mostrada na Figura 4.2 foi dividido em duas partes, mostrando que a primeira parcela é proporcionada pelo indutor, em uma etapa de descarga de energia. A segunda parcela da onda é proporcionada pelo capacitor, por meio

da reatância capacitiva, que opera em conjunto com a resistência da carga, atuando como um circuito amortecedor. A parcela de subida da onda, gerada por meio do indutor, pode ser descrita pela relação expressa na Equação 4.4.12.

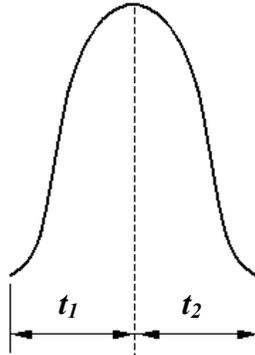


Figura 4.2 – Parcelas de construção da onda.

$$V_1 = V_i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.4.12)$$

Ao considerar a forma de onda desejada, a Equação 4.4.12 pode ser aproximada pela Equação 4.4.13.

$$V_1 = \left(V_i + L \cdot \frac{\Delta i}{t_1} \right) \cdot \text{sen}(wt_1) \quad (4.4.13)$$

Para definir a parcela de descida, foi utilizada a reatância do capacitor, de acordo com a Equação 4.4.14.

$$V_2 = -C \cdot X_c \frac{dV}{dt} \quad (4.4.14)$$

Nessa condição, a Equação 4.4.14 pode ser aproximada pela Equação 4.4.15. Associando as Equações 4.4.13 e 4.4.15 é obtida a Equação 4.4.16., onde X_C é a reatância.

$$V_2 = -C.X_c \frac{\Delta V}{t_2} . \text{sen}(\omega t_2) \quad (4.4.15)$$

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (4.4.16)$$

Como um dos grandes objetivos deste trabalho é flexibilizar a potência fornecida na saída com o uso de um pequeno banco de baterias na entrada, a fonte de alimentação pode ser considerada como um sistema composto por duas fontes, sendo a principal composta pela PaCOS e a complementar pelo banco de baterias, conforme apresentado na Figura 4.3. Para definir o melhor ajuste dos processos de carga e descarga das baterias, o banco foi dividido em duas partes, permitindo conexões em série ou em paralelo, de acordo com a interação de carregar ou descarga. Para que o sistema de alimentação opere de forma adequada, foram previstas chaves para interconexão do banco de baterias ao conversor e da PaCOS com o banco de baterias.

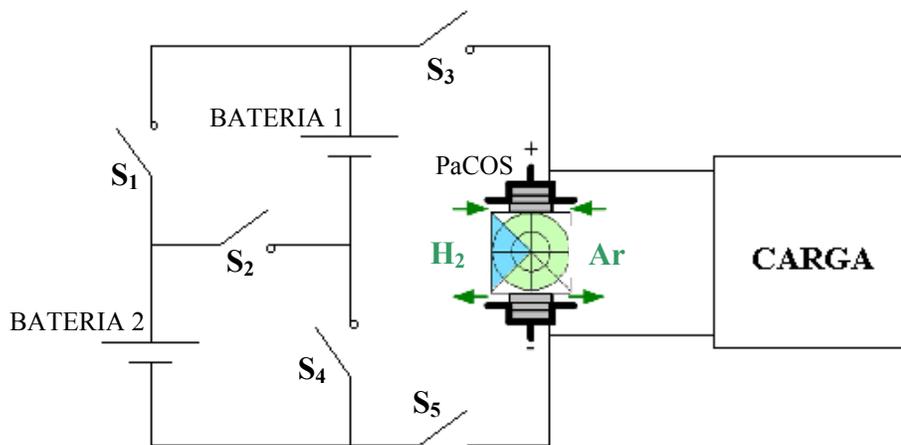


Figura 4.3 – Configuração da fonte de alimentação.

Essa interconexão é definida pelo sistema de controle em função da demanda de potência, permitindo que o banco de baterias esteja complementando a potência necessária no sistema ou esteja armazenando parte da potência produzida pela PaCOS, por meio do processo de recarga das baterias. Para uma condição de carga nas baterias, serão fechadas as chaves S1, S4, S3 e S5. Na condição de descarga serão fechadas as chaves S2, S3 e S5.

Com isso, as baterias são carregadas com uma conexão em paralelo e descarregadas com uma conexão em série.

O inversor possui a função de converter a tensão contínua da entrada em uma tensão alternada, com amplitude e frequência pré-determinadas. Nessa configuração foi adotado um inversor monofásico de onda quadrada, conforme ilustrado na Figura 4.4. Ao ligar os transistores T1 e T4 será obtida a parcela positiva da tensão na saída, e de forma complementar, ao ligar os transistores T2 e T3 será obtida a parcela negativa da tensão de saída. É importante ressaltar que a função dos diodos no circuito é fornecer um caminho para a corrente no caso em que a carga apresenta características indutivas, fazendo com que os diodos tenham uma condução de retorno de corrente para a fonte.

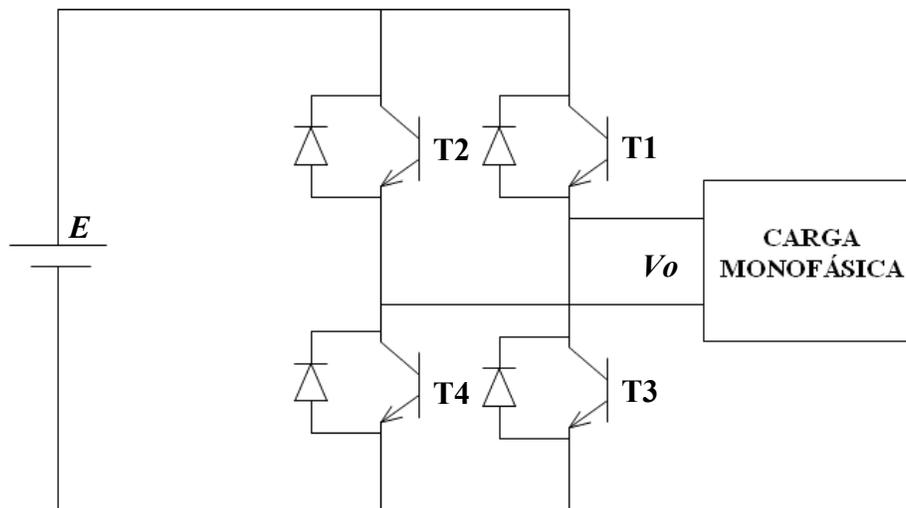


Figura 4.4 – Circuito do conversor inversor.

5- Algoritmo Genético

5.1- Introdução

O Algoritmo Genético (AG) é um ramo dos Algoritmos Evolucionários e é considerado basicamente como um conjunto de técnicas de otimização voltadas para solução de um determinado problema, com a utilização de ferramentas computacionais [87]. A história dos AGs foi iniciada na década de 40, quando os cientistas começaram a tentar se inspirar na natureza para criar o ramo da inteligência artificial. O termo Algoritmo Genético foi usado pela primeira vez na Holanda [88]. Os fundamentos dos AGs são baseados nos fenômenos evolucionários observados na natureza, ou seja, os métodos genéticos de evolução dos seres vivos, estabelecendo processos que dependem do desempenho dos indivíduos de uma espécie dentro do ambiente. Os AGs procuram imitar esses processos aplicando população de soluções em problemas do mundo real [89].

Nos últimos anos os AGs têm tido aplicação em vários campos da ciência e tecnologia, tal como bioinformática, manufaturados, engenharia, economia, matemática, química, física, entre outros [89]. Os AGs são métodos adaptativos que podem ser usados para resolver problemas de otimização. Uma grande vantagem dos AGs está em não necessitar do cálculo de funções derivadas que não podem ser facilmente assimiladas ou processadas. Outra vantagem do AG é que a representação em cromossomos não depende da função objetivo, mas apenas das restrições do problema [90]. A cada interação o AG evolui a população atual de cromossomos para uma nova população, utilizando os mecanismos de seleção, reprodução e mutação.

Um grande número de variantes do AG pode ser obtido variando os operadores de seleção, reprodução, e mutação. Mecanismos adaptativos também podem ser adicionados para ajustar as probabilidades dos operadores de cruzamento e mutação, procurando melhorar a habilidade de encontrar a solução ótima [91]. O AG mantém a forma dinâmica do sistema produzindo soluções adaptativas. As desvantagens do modelo clássico de AG estão no grande tempo de processamento consumido pelos cálculos e na falta de um mecanismo de controle que permita identificar se a solução está em um mínimo global [92].

AGs são iniciados com uma população inicial de possíveis soluções para um dado problema, onde cada indivíduo é representado usando alguma forma de codificação. Para busca de uma solução em um determinado problema os métodos de construção de um AG criam estruturas denominadas indivíduos ou cromossomos, que são divididos em pequenas partes chamadas de genes, as quais quantificam suas características como solução [87]. Esses parâmetros genéticos, conhecidos como genes, são aplicados juntos em uma *string* de valores que representa ou codifica a solução de um problema. Tradicionalmente, a maioria dos cromossomos (ou indivíduos) no AG têm sido representados por uma *string* de valores binários. Porém, na programação de muitos problemas a codificação binária não promove uma representação compacta de uma solução [93]. Se uma variável é binária então o gene correspondente é 0 ou 1. Se a variável é um valor inteiro qualquer ou contínuo, sua variação é dada pela configuração do problema, conforme mostrado na Figura 5.1.

CROMOSSMO DE VALORES BINÁRIO								CROMOSSMO DE VALORES INTEIROS REAIS							
1	0	0	1	0	1	1	0	2	5	48	25	7	69	16	32

Figura 5.1 – Exemplo de tipos de cromossomos.

Cada indivíduo recebe uma avaliação em função das suas características, que é conhecida como aptidão e expressa uma quantificação da sua qualidade ou mérito do indivíduo como solução do problema em questão [88]. A partir daí, são criadas populações de indivíduos e aplicadas as diversas operações genéticas, como seleção, reprodução (cruzamento), mutação, entre outras. Essas operações são semelhantes aos mecanismos utilizados na evolução das espécies, de forma a estabelecer a sobrevivência do mais apto. Baseado na avaliação de aptidão, determinados indivíduos da população são selecionados para o processo de reprodução. Quanto maior a aptidão maior é a probabilidade de o indivíduo ser selecionado para o processo de reprodução [94], conforme esquematizado na Figura 5.2, que mostra um dos métodos de seleção existentes no AG, conhecido como o método da roleta viciada. Esse método estabelece uma ligação direta entre a aptidão do indivíduo e a probabilidade de seleção para reprodução.

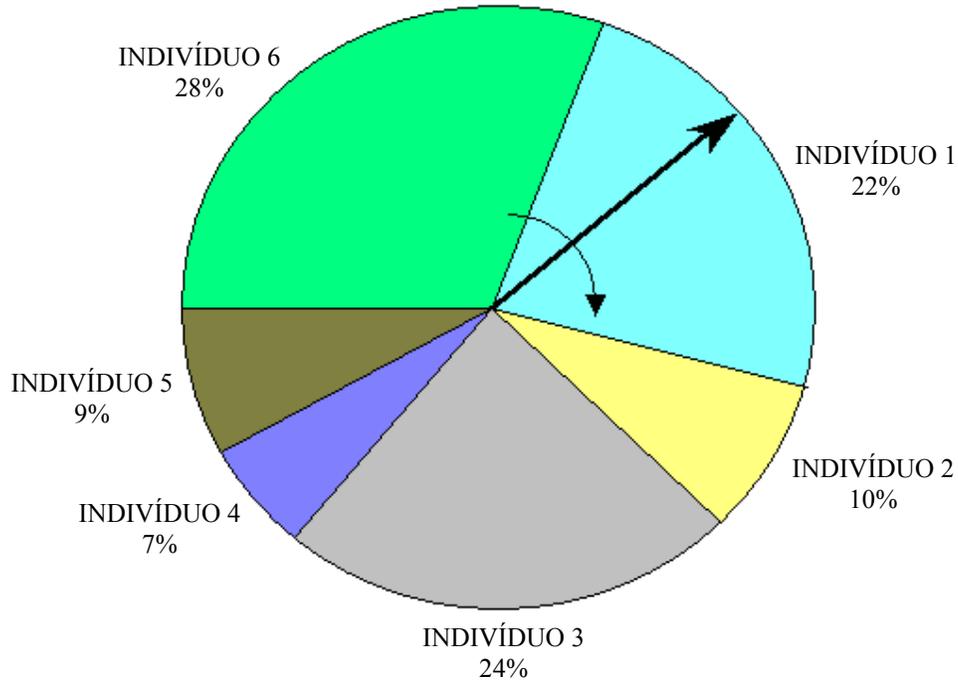


Figura 5.2 – Método de seleção por roleta viciada.

A fase de reprodução é ilustrada na Figura 5.3, que usa a operação de cruzamento para combinar os indivíduos selecionados da população atual, produzindo uma descendência que é introduzida na nova população.

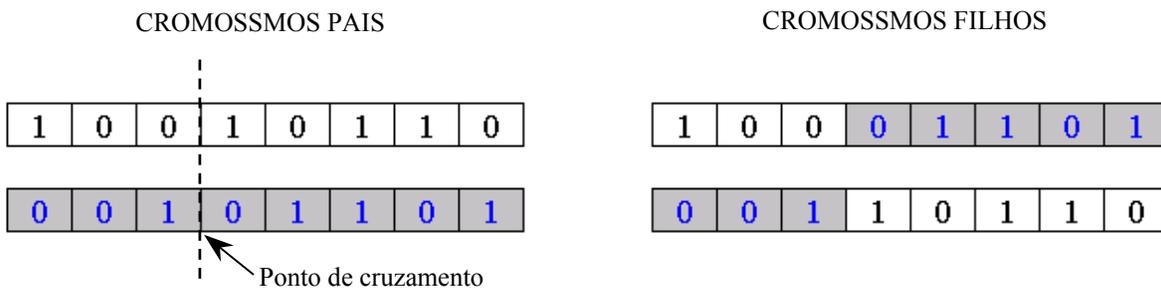


Figura 5.3 – Exemplo cruzamento de cromossomos binários.

A fase de seleção de indivíduos é afetada pelos processos de cruzamento e mutação da geração anterior. Paralelamente a etapa de seleção é aplicada a operação de elitismo, que

tem como estratégia selecionar e copiar alguns dos melhores indivíduos da população atual para a nova população [88]. Essa operação tem como objetivo forçar ou facilitar a convergência da população para uma solução ótima. Como exemplo, uma variação simples e relativamente comum no processo de cruzamento é a alteração no número dos pontos de cruzamento, conforme exemplificado na Figura 5.4.

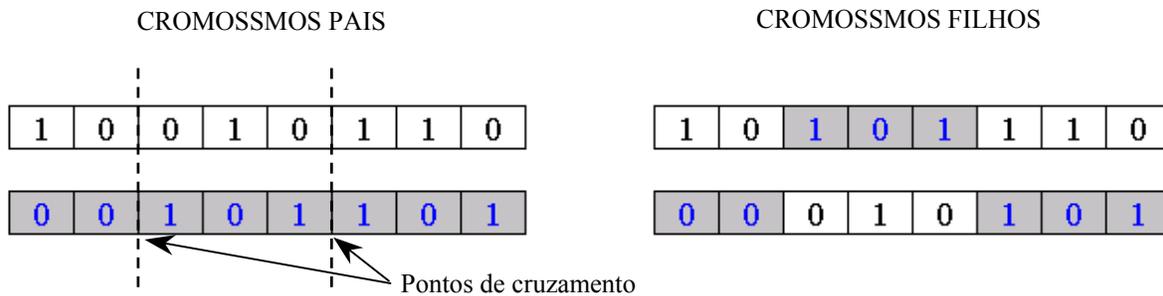


Figura 5.4 – Exemplo cruzamento de cromossomos binários em dois pontos.

Considerando o indivíduo como um código de uma solução, o operador de cruzamento tende a melhorar a qualidade da população. Essa operação também tende a forçar a convergência dos indivíduos para solução ótima. Posteriormente, o operador de mutação é aplicado em alguns indivíduos, objetivando mudar seu material genético [93]. O operador de mutação tenta garantir a diversidade populacional e assegurar uma pesquisa extensiva no espaço de soluções. Se a variável utilizada é binária a mutação ocorre com a alteração de 0 para 1 ou de 1 para 0. Para mutação em outro tipo de variáveis a escolha de valores é feita aleatoriamente dentro da faixa de trabalho [88].

Como a estrutura dos Algoritmos Genéticos está ligada aos métodos estatísticos, dependendo fortemente de fatores probabilísticos tanto na fase de inicialização da população quanto na fase de evolução, a sua viabilidade está diretamente relacionada com a aplicação de ferramentas computacionais, que possibilitam o processamento numérico das diversas soluções e gerações no processo de evolução. Esses métodos de evolução, que podem ser considerados como técnicas de busca, fazem parte de um ramo chamado de Técnicas Aleatórias Guiadas, pois apesar de utilizar componentes aleatórios, eles usam as

informações do estado atual para guiar a pesquisa, diferentemente dos métodos puramente aleatórios.

A combinação das estratégias estabelecidas no AG melhora a população de geração a geração até que o membro mais apto da população represente uma solução mais próxima da ótima [90]. AGs são tipicamente mais ajustáveis para otimização de problemas discretos que para problemas com variáveis contínuas. No AG cada nova geração de soluções é observada como sendo um melhoramento sobre as antigas gerações. Esse processo é repetido interativamente até que apareça uma população aceitável como solução [94].

Considerando o comportamento extremamente não-linear de operação das PaC e o grande número de variáveis relacionadas no processo, as quais possuem uma difícil associação de parâmetros para obtenção de um estado eficiente de operação, foram aplicados os métodos de AGs para determinação do ponto ótimo de operação do sistema. Essa aplicação de AG procurou viabilizar a estratégia de controle adotada e permitir uma correta obtenção de resultados no processo de simulação. Isso permite que a estratégia de controle utilize esse ponto como valor estacionário de funcionamento da PaC e gerencie o comportamento dinâmico da demanda de potência através do banco de baterias e processos de recirculação parcial dos reagentes. Nessa situação foi aplicado um AG básico com uma estrutura geracional, aplicando o ciclo de operações genéticas de geração populacional, avaliação de aptidão, seleção, elitismo, reprodução e reconstrução populacional. Essa metodologia teve como objetivo a determinação dos valores ótimos das variáveis para o ponto de operação desejado. Esse AG foi desenvolvido com o programa *Matlab*.

5.2- Aplicação do Algoritmo Genético

A estrutura de evolução das soluções foi baseada na operação de um Algoritmo Genético básico, com um perfil geracional, trabalhando com números decimais, conforme o ciclo de operação descrito na Figura 5.5 e o código de programação apresentado no Anexo A. Com essa aplicação são pré-definidos os pontos de operação estacionária que serão utilizados pelo sistema de controle, evitando o processamento em tempo real das operações genéticas.

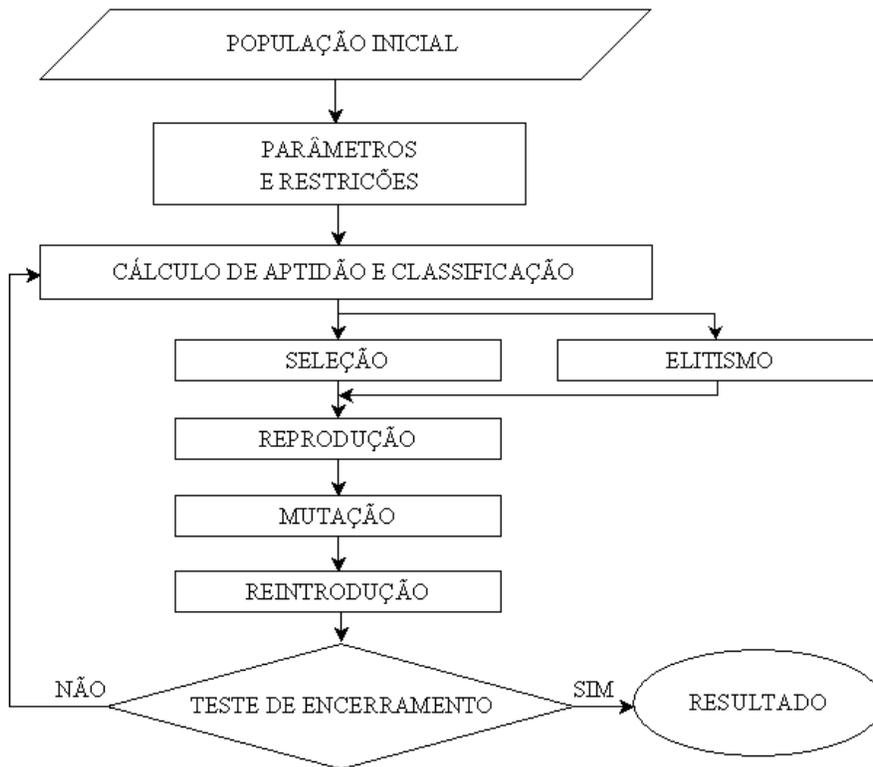


Figura 5.5 – Diagrama de operação do Algoritmo Genético desenvolvido.

Nessa configuração de evolução das soluções o processo é iniciado com a construção de uma população inicial com valores aleatórios. Em seguida é imposta a operação de avaliação dos indivíduos com base no valor da aptidão, o que quantifica o seu potencial como solução. O próximo passo é a seleção dos indivíduos que participarão do processo de reprodução, através do método de roleta viciada, onde as chances de escolha no sorteio são proporcionais aos valores de aptidão dos indivíduos.

A etapa seguinte consiste na reprodução, também conhecida como operação de cruzamento, onde os indivíduos (ou cromossomos) são particionados e recombinados, associando partes de ambos os envolvidos na operação. Depois é promovida a re-introdução dos indivíduos filhos no lugar antes ocupado pelos indivíduos pais, anteriormente envolvidos na reprodução. Finalizando, é executada a operação de elitismo, onde são re-introduzidos aleatoriamente alguns indivíduos anteriormente avaliados com melhor aptidão, com o objetivo de facilitar a convergência mais rápida da evolução para o

resultado ótimo. Através dessas etapas é estabelecido um ciclo de evolução, que está associado à produção de novas gerações de indivíduos, que teoricamente ficam melhores a cada ciclo de operações genéticas.

Para o acompanhamento dos processos de evolução das soluções, foram confeccionados gráficos que mostram a evolução a cada geração, tanto para aptidão média populacional como para solução de aptidão máxima da geração. Os gráficos das Figuras 5.6 e 5.7 apresentam duas curvas, sendo uma para aptidão máxima e outra para aptidão média populacional.

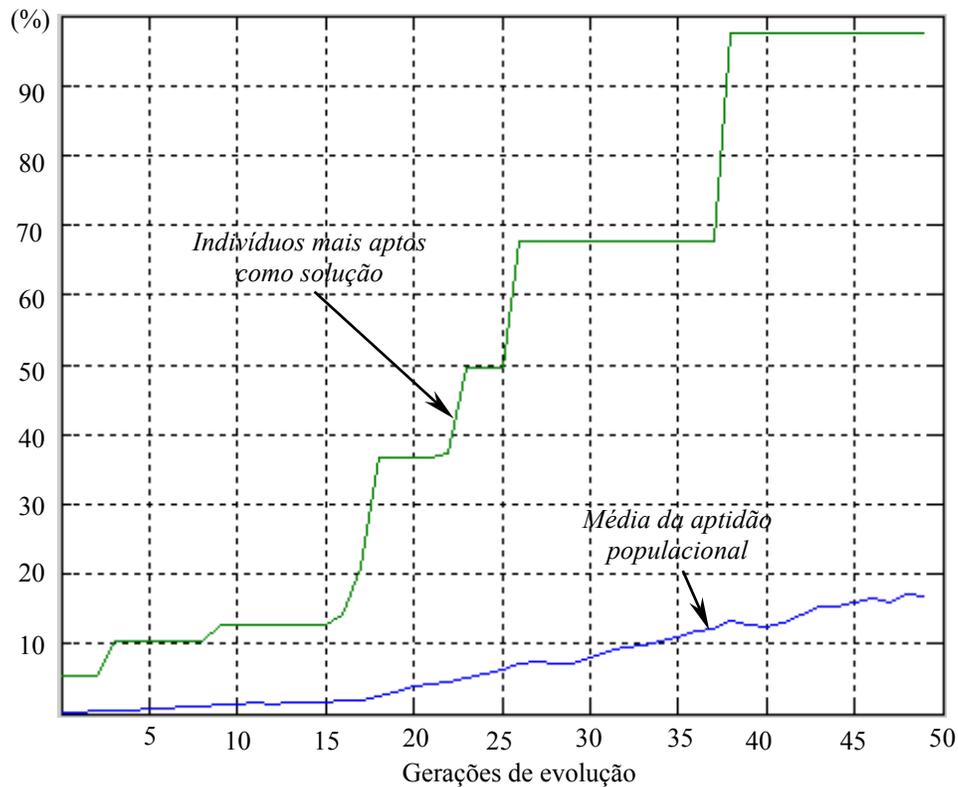


Figura 5.6 – Gráfico de evoluções genéticas das soluções com uma população de 200 indivíduos.

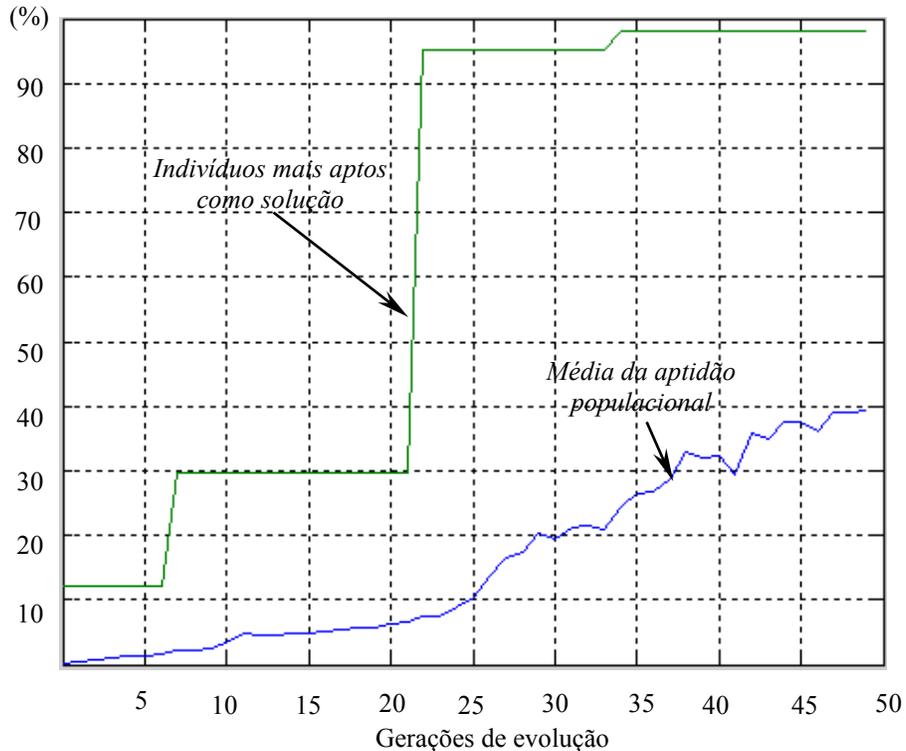


Figura 5.7 – Gráfico de evoluções genéticas das soluções com uma população de 100 indivíduos.

As funções de avaliação da aptidão foram estruturadas com base nas equações que descrevem o comportamento do BdP e da PaCOS, conforme descrito no capítulo de modelagem. As variáveis de operação foram selecionadas e codificadas para a construção do indivíduo. A cada geração todos os cromossomos são avaliados como solução para as equações de comportamento da PaC. Esse processo de evolução resultou nos valores apresentados na Tabela 5.1. Nesse processo foram otimizados tanto parâmetros operacionais como construtivos da PaCOS, o que representa uma vantagem sobre os métodos convencionais.

Tabela 5.1 – Valores ótimos dos parâmetros de operação da PaC.

X_0	0,288	----
X_{H2}	0,952	----
N_{CP}	0,121	cm^3/min
P_{FC}	1,653	bar
T	956,142	K
A	108,104	cm^2
N_0	42,511	----
N_{H2}	1,356	kg/s

Uma característica importante na aplicação do Algoritmo Genético está no fato dele ser um método de avaliação adimensional, fazendo com que o processo de análise independa da unidade para o processamento das soluções. Essa característica provoca a necessidade de definição de limites para variação dos valores manipulados. Esses limites evitam que o Algoritmo Genético encontre valores que não são aplicáveis na realidade.

Para aplicação no sistema proposto os parâmetros genéticos utilizados na evolução relacionam uma população de 200 indivíduos, seleção para reprodução de 60%, elitismo de 4, e com 50 gerações. O número de indivíduos na população é pequeno porque a região de soluções válidas é muito restrita em função dos limites de valores aplicáveis. Quanto menor o número de indivíduos na população fica mais difícil encontrar o indivíduo mais apto e a evolução fica menos gradativa.

6- Simulação

6.1- Estratégia de controle

A simulação desenvolvida foi baseada na estratégia de controle adotada, que busca equilibrar a potência fornecida com a demanda de potência, auxiliada por um banco de baterias. Essa estratégia mantém a PaC o máximo de tempo possível trabalhando no ponto ótimo de operação (de maior eficiência), suprimindo apenas as variações na demanda com as baterias, através de ciclos de carga e descarga, consumindo ou fornecendo potência, respectivamente. No estado crítico de operação, com a demanda muito abaixo do ponto ótimo de operação, o sistema entra em processo de recirculação parcial dos gases reagentes, juntamente com uma redução proporcional na rotação do ventilador para manter a temperatura de operação. Mesmo em um nível mais baixo de potência o sistema continua sendo auxiliado pelo banco de baterias. Essa lógica de operação foi simulada no programa *Simulink* do *Matlab*, conforme apresentado no Anexo B.

Como o interesse principal dessa simulação está na estratégia de controle com baterias e a interação da parte eletroquímica no processo, que são as partes mais

complicadas, a simulação considerou que a parcela de energia térmica produzida na PaC gira em torno do mesmo valor da energia elétrica produzida.

Para determinação da potência consumida nos pequenos componentes eletromecânicos, como válvulas e pequenos acionadores, foi considerado que o somatório de consumo desses elementos é da grandeza de 15% da potência consumida nos sopradores. Esse percentual é aceitável em função dos sopradores representarem grande parte do consumo interno do sistema e a operação prevista ser em regime estacionário, onde todos os componentes permanecerão no mesmo estado ou condição de funcionamento, praticamente durante todo o tempo.

A estrutura de simulação foi construída através das equações de modelagem descritas no capítulo 4, acrescentando limites de operação, entradas de sinal e pontos de resposta do sistema. Os valores utilizados como parâmetro de simulação foram obtidos através da aplicação de AG, definindo o ponto ótimo de operação para a potência desejada. Com base nessa configuração de operação foram obtidos os gráficos de demanda e fornecimento de potência, mostrando a capacidade de ajuste do sistema proposto perante condições de demanda variável.

Para avaliação da resposta dinâmica do sistema de geração de potência proposto, a estratégia de controle foi aplicada na configuração de simulação, gerando um sinal de demanda de potência, o monitoramento da potência gerada na PaC e a apresentação da potência balanceada ou disponível na saída do sistema, que expressa a resposta do equipamento às variações de demanda. Foi considerado um intervalo de 10 segundos com variações acentuadas na demanda de potência, representando as diversas solicitações de consumo que podem ocorrer em uma residência. Para essas simulações foi considerado que a potência estacionária da PaC é de 1,5kW e o banco de baterias terá uma capacidade dinâmica de 0,5kW, para absorção e descarga de energia, conforme apresentado nos gráficos das Figuras 6.2, 6.3, e 6.4. Onde o W expressa a unidade de potência Watt, que nesse caso está voltada para aplicações elétricas.

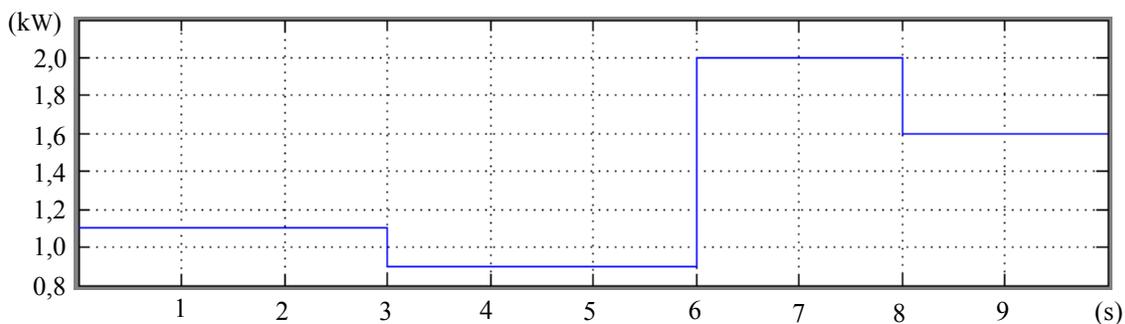


Figura 6.2 – Gráfico da demanda de potência para condição 1.

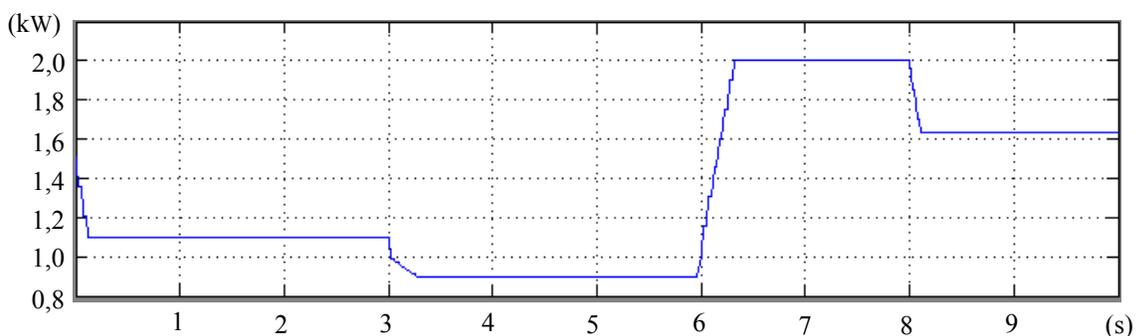


Figura 6.3 – Gráfico da potência balanceada na saída para condição 1.

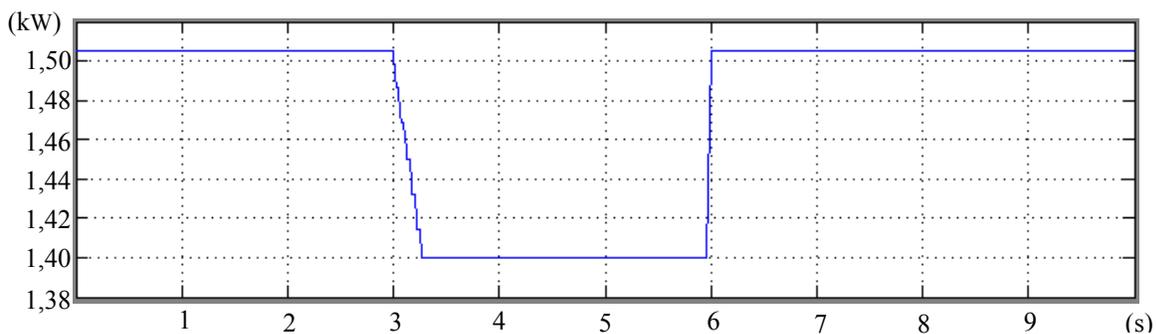


Figura 6.4 – Gráfico da potência produzida na PaCOS para condição 1.

A potência produzida na PaC é apresentada na Figura 6.4, demonstrando o regime estacionário de operação que é interrompido por um processo de recirculação de reagentes, reduzindo a potência gerada. O processo de recirculação é gerado pelo sistema de controle somente em condições críticas de operação, onde a demanda de potência está abaixo do valor mínimo alcançado durante o carregamento das baterias, que no caso é 1kW.

Para confirmar a flexibilidade do sistema, foram confeccionados novos gráficos (Figuras 6.5, 6.6, e 6.7), agora relacionando novas condições na demanda de potência.

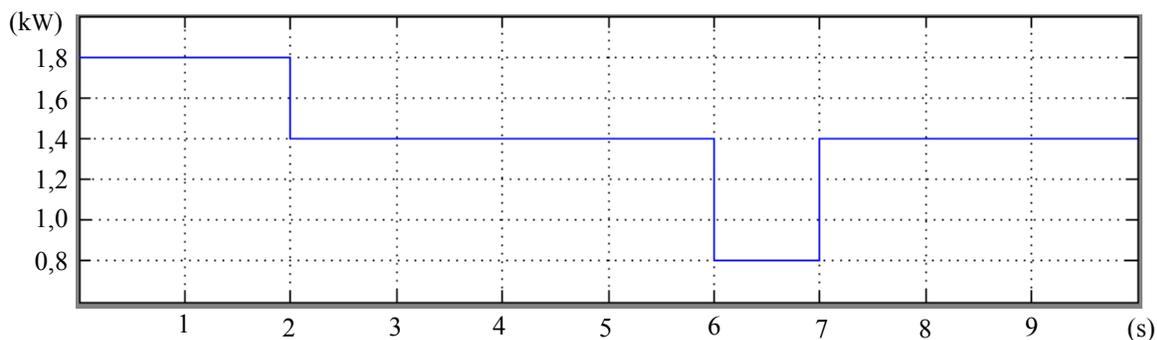


Figura 6.5 – Gráfico da demanda de potência para condição 2.

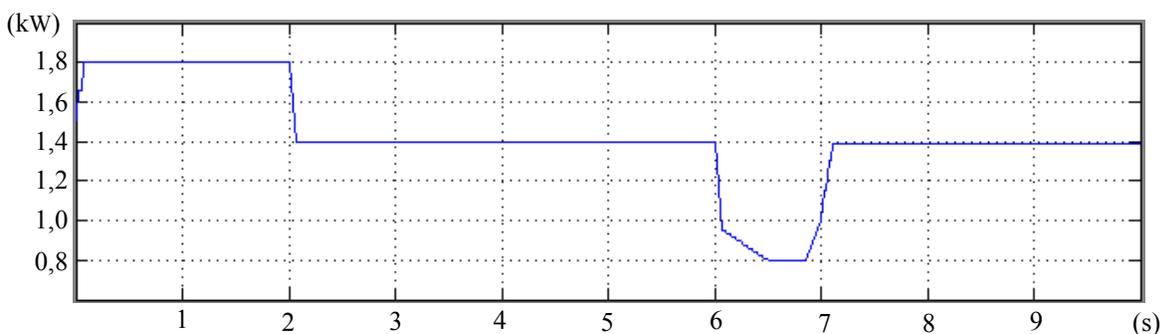


Figura 6.6 – Gráfico da potência balanceada na saída para condição 2.

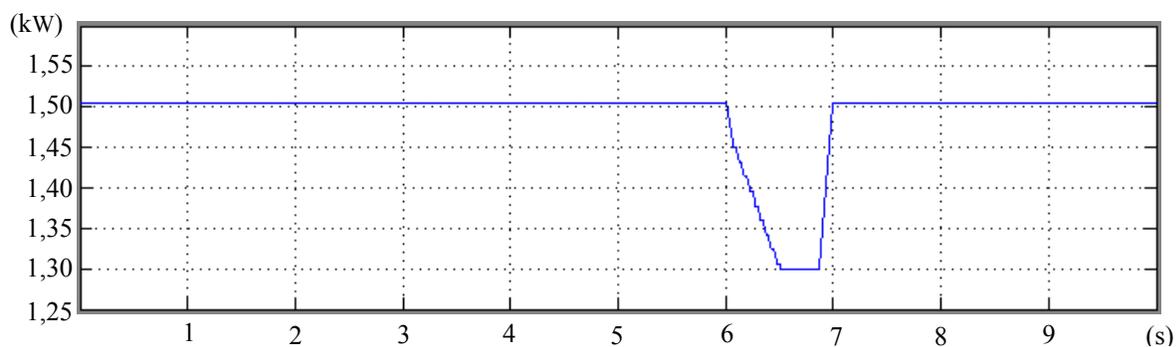


Figura 6.7 – Gráfico da potência produzida na PaCOS para condição 2.

Com esse resultado fica evidenciada a necessidade de um correto dimensionamento do sistema para aplicação desejada, evitando que o equipamento entre em condições críticas de operação fora do alcance de cobertura do banco de baterias. O sistema de controle foi programado para não ultrapassar o valor de 2kW, considerando esse valor como uma condição de pico de consumo e 1,5kW como uma condição média para um consumo residencial.

6.2- Circuito de potência

Como passo obrigatório na avaliação da configuração proposta, inicialmente foi estruturada uma simulação no *Simulink* para o sistema elevador de tensão, com o objetivo de obter a visualização da tensão e corrente desse conversor. O circuito de simulação utilizado é mostrado na Figura 6.8.

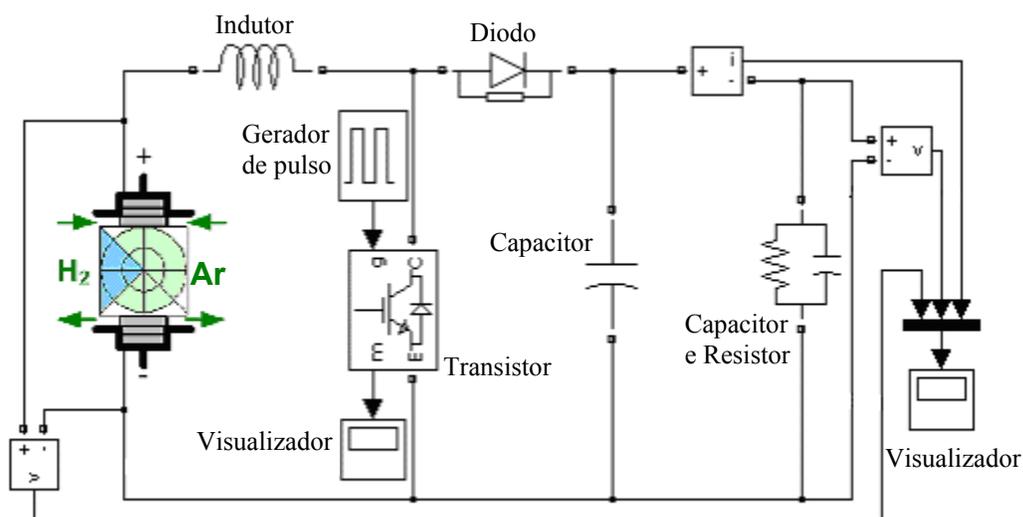


Figura 6.8 – Circuito de simulação do elevador de tensão.

Considerando os valores aproximados e previstos para o projeto desse sistema, foram executadas as simulações considerando a carga como um capacitor e um resistor, inicialmente simulando a operação em baixa frequência, conforme exposto no gráfico da Figura 6.9. Nesse processo foram utilizadas uma fonte de 55V, um indutor de 80mH, um capacitor de 40 μ F e uma resistência com 60 Ω , que foram obtidos através de ajustes e observações no processo de simulação, para obtenção do resultado desejado.

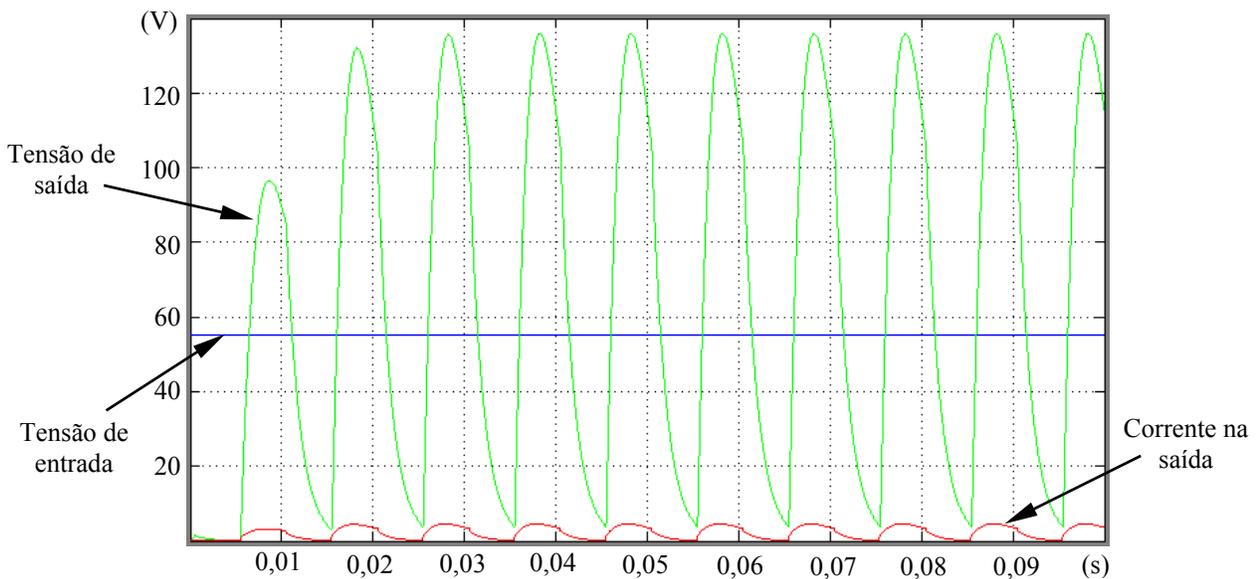


Figura 6.9 – Gráfico de operação do elevador de tensão.

Apesar da corrente no gráfico da Figura 6.9 sugerir um modo de condução descontínua na operação em baixa frequência de sincronismo, com o comportamento da corrente no indutor pode ser observado que o circuito ainda opera em regime contínuo de condução. A corrente no indutor e seu comportamento em modo contínuo são apresentados na Figura 6.10, agregando as respectivas vantagens ao sistema proposto.

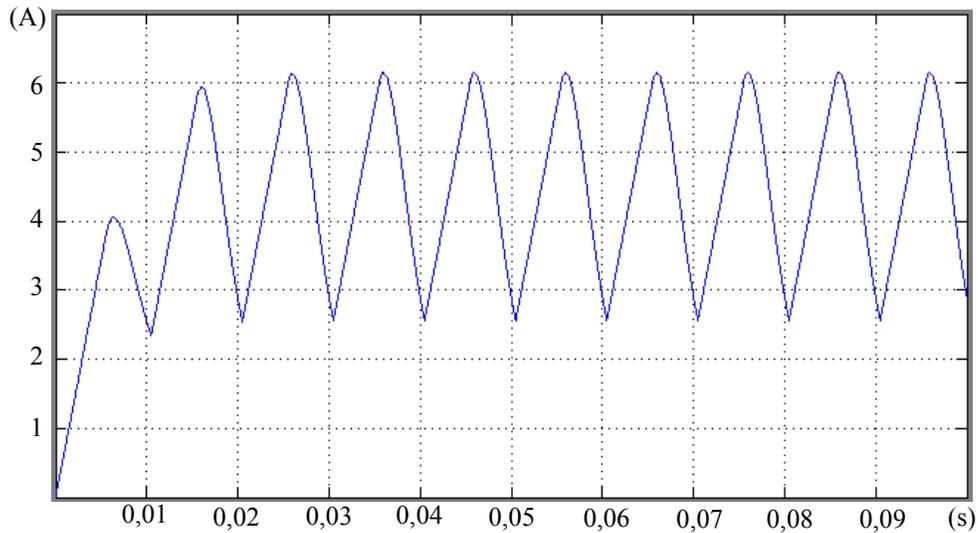


Figura 6.10 – Gráfico da corrente no indutor do elevador de tensão.

Com base no gráfico da Figura 6.9 foi observada a oportunidade de aproveitamento das ondas geradas pelo elevador de tensão para formação das ondas senoidais de saída do conversor. As ondas geradas no elevador de tensão são resultado dos processos de armazenamento de energia nos componentes passivos do circuito, como indutor e capacitor. Para o aproveitamento dessa oscilação no inversor foi previsto um sincronismo entre a frequência do inversor e a do elevador de tensão.

Como outra opção para o aproveitamento dos processos transientes de operação do conversor elevador de tensão, o circuito foi simulado em alta frequência, mostrando no gráfico da Figura 6.11 a região de elevação transiente favorável para construção da onda de saída. Essa opção de chaveamento aproveitaria a curva de elevação da tensão e geraria desligamentos progressivos para conduzir a tensão a um valor nulo, seguido por um processo de filtragem.

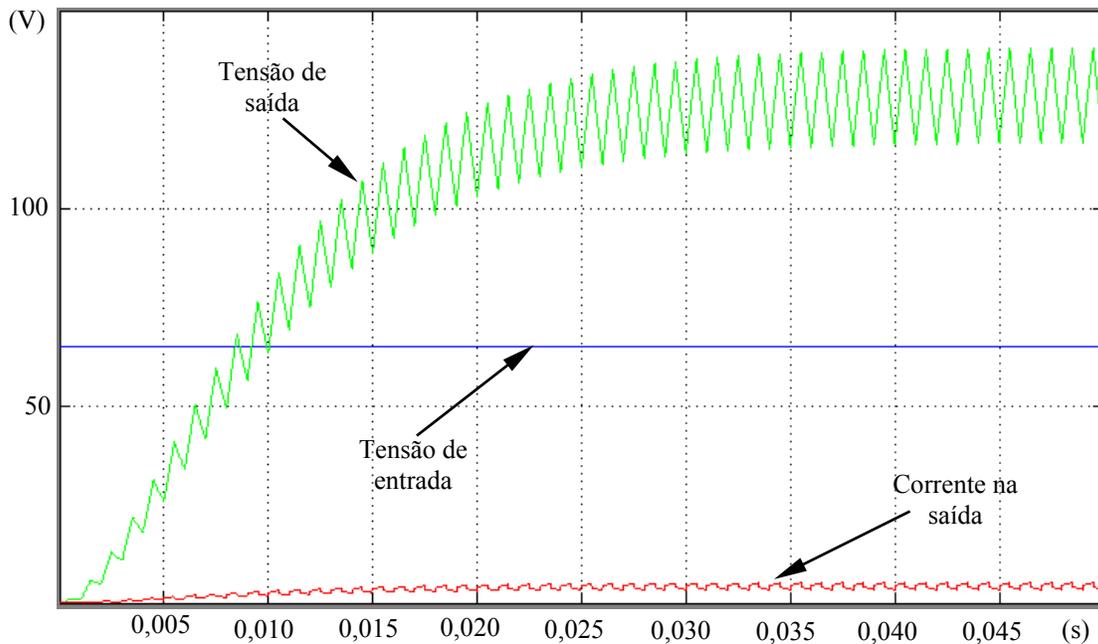


Figura 6.11 – Gráfico de operação do elevador de tensão em alta frequência.

Nesse regime de chaveamento é observado o modo de operação contínua, onde a corrente não passa pelo zero. Porém, a idéia principal é operar em baixas frequências de chaveamento e processos de sincronismo interno e de forma alternativa operar em altas frequências, somente quando o perfil de carga não permitir o ajuste para o sincronismo de chaveamento entre o elevador e o inversor. Apesar da operação em alta frequência trazer as vantagens relacionadas com um domínio maior da elevação tensão, esse processo de operação introduz um número maior de harmônicos, em função do grande número de comutações de cada IGBT.

De forma complementar, foi avaliado comportamento de tensão e corrente no IGBT do elevador de tensão em baixa frequência, conforme mostrado na Figura 6.12.

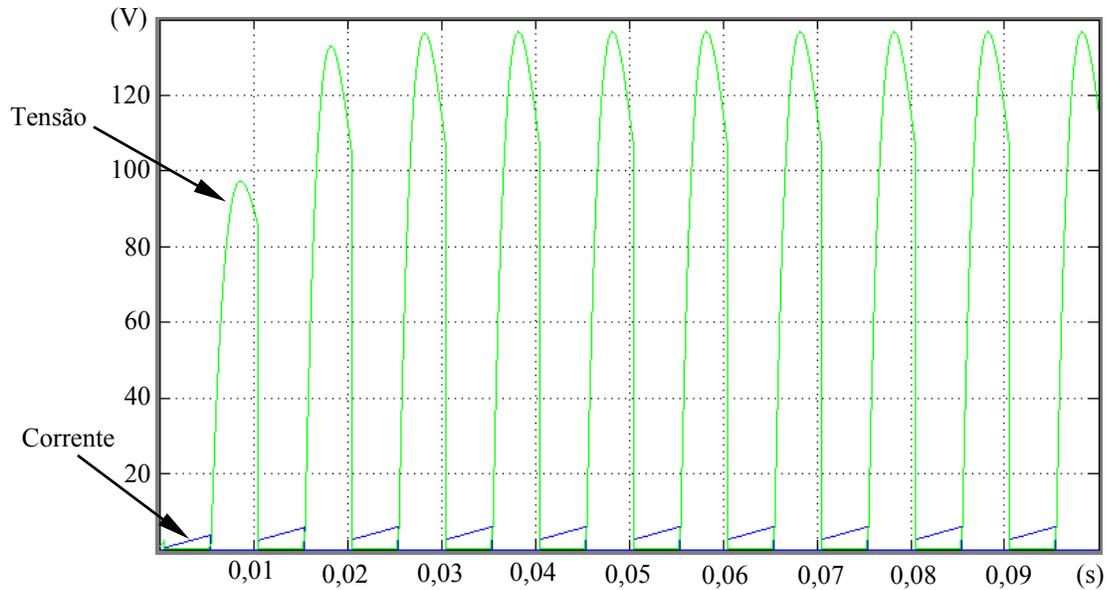


Figura 6.12 – Gráfico de operação do IGBT no elevador de tensão em baixa

Para avaliação da outra parcela do conversor, foi implementado isoladamente no *Simulink* o circuito relativo ao inversor monofásico previsto para o conversor. Nesse circuito foi introduzida uma fonte equivalente a tensão fornecida pelo elevador e considerada a mesma carga na saída do inversor. Com essa configuração foi simulado o comportamento de chaveamento, de acordo com o circuito apresentado na Figura 6.13.

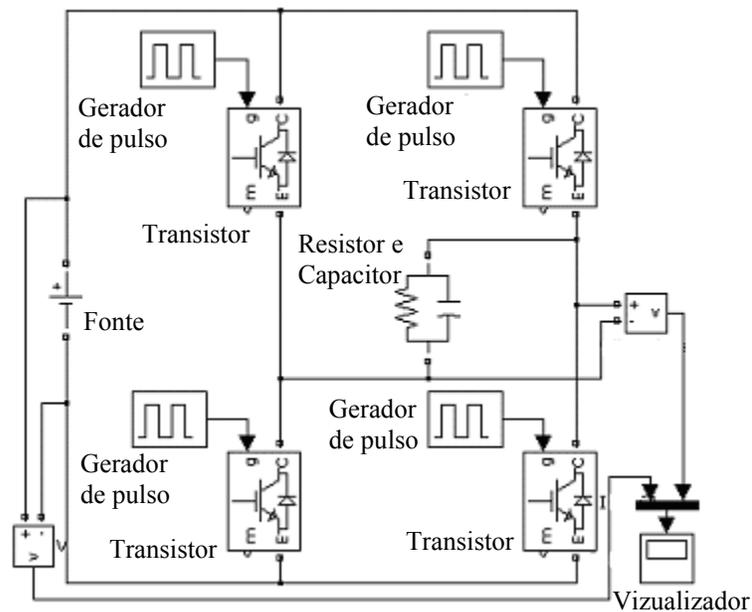


Figura 6.13 – Circuito de simulação do inversor de tensão.

Utilizando os valores previstos para o inversor, foram simuladas as condições de operação do circuito, resultando no gráfico apresentado na Figura 6.14.

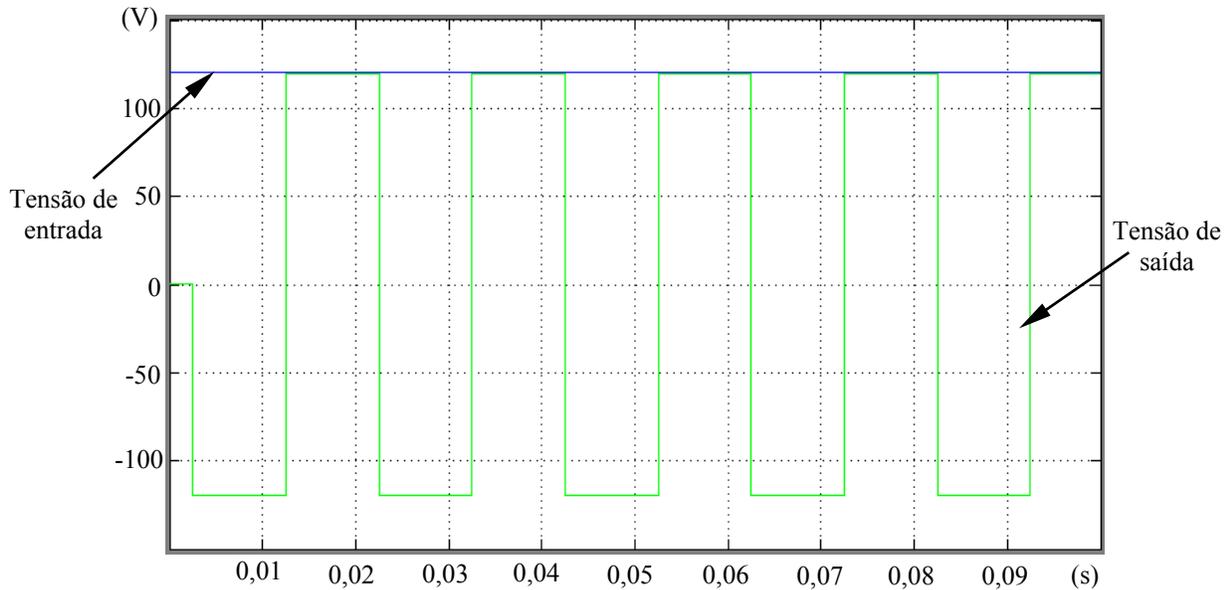


Figura 6.14 – Gráfico de operação do inversor de tensão.

De acordo com o objetivo principal do trabalho, foram associados os dois conversores anteriormente simulados (elevador de tensão e inversor), conforme a Figura 6.15.

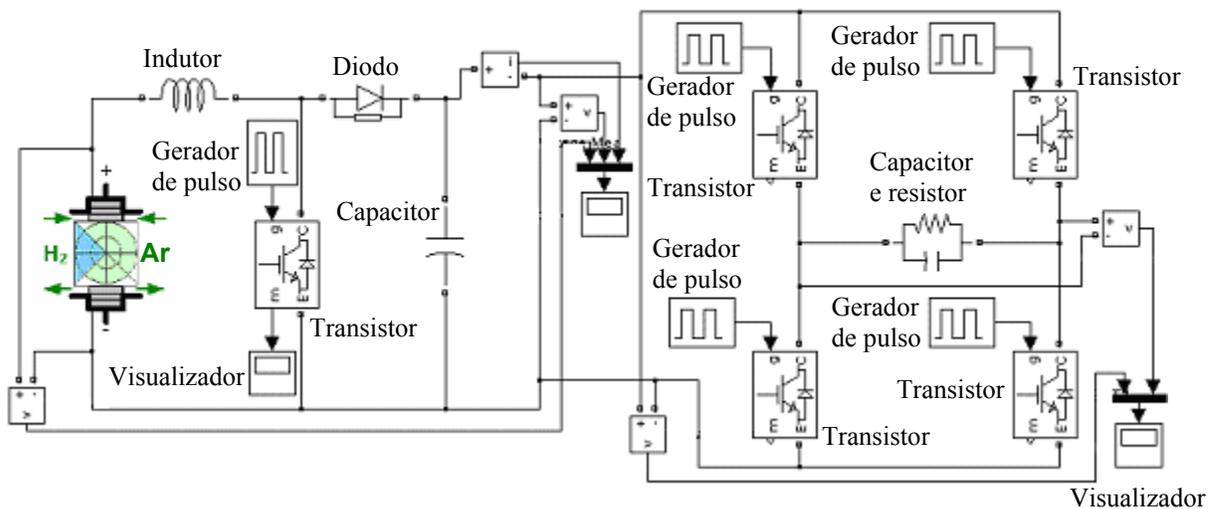


Figura 6.15 – Circuito de simulação do conversor completo.

O circuito da Figura 6.15 foi simulado com base nos mesmos valores utilizados na simulação de suas partes. Os resultados obtidos foram apresentados na Figura 6.16.

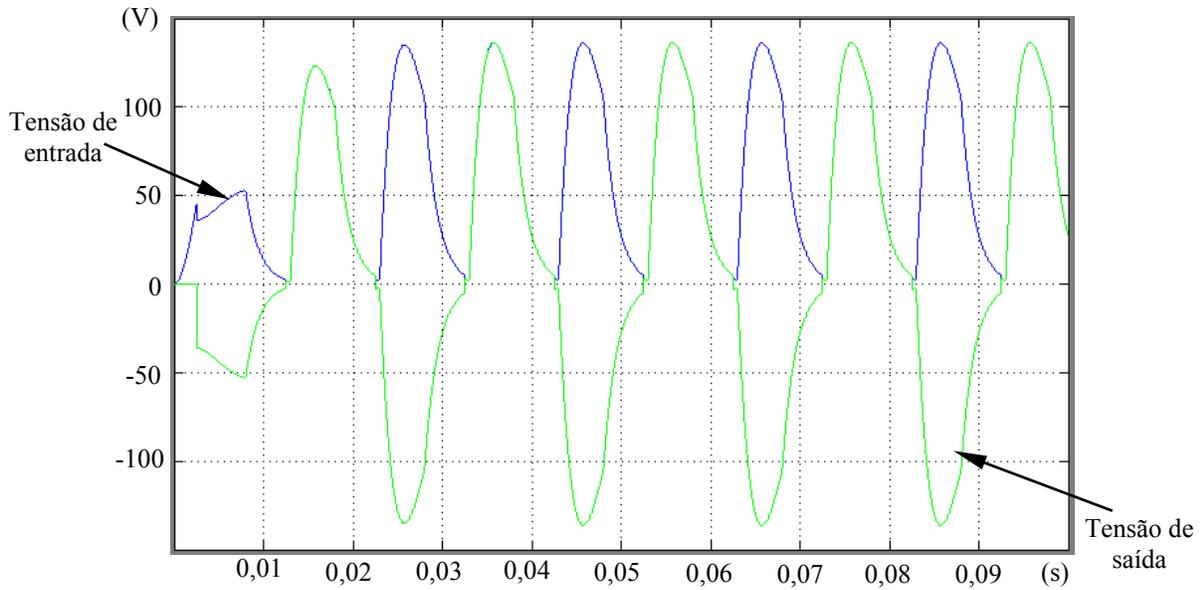


Figura 6.16 – Gráfico de operação do conversor completo com carga resistiva.

Considerando a mudança de comportamento desse sincronismo em função de alterações no perfil de carga, foi aplicada uma carga com predominância indutiva, testando o comportamento nessa condição, conforme descrito no gráfico da Figura 6.17.

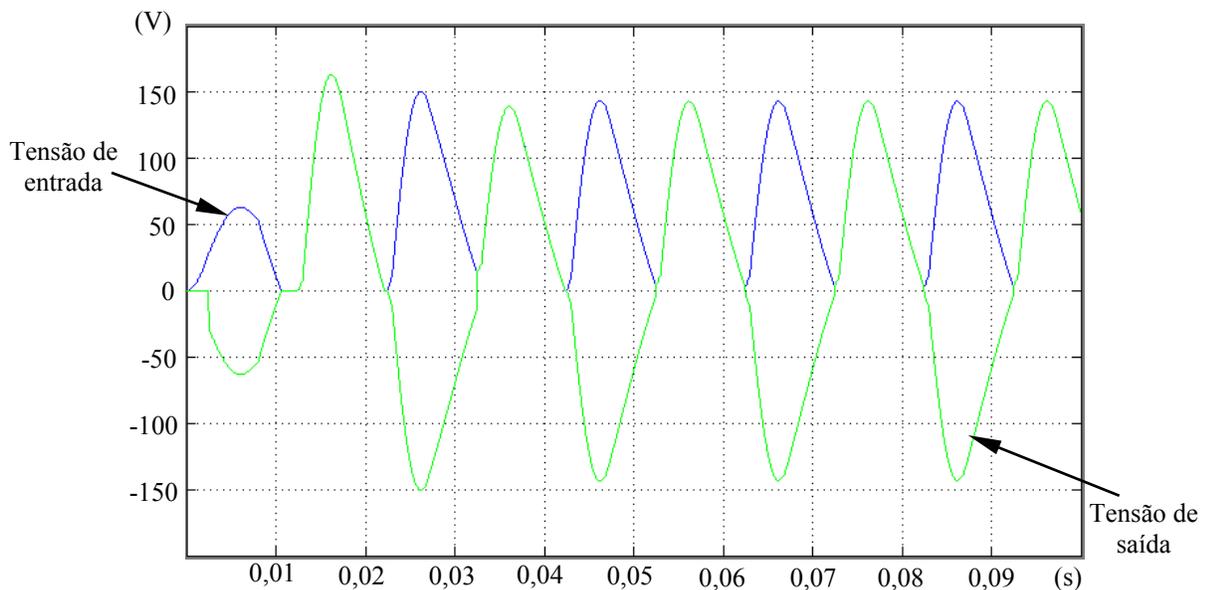


Figura 6.17 – Gráfico de operação do conversor completo com carga indutiva.

De acordo com a Figura 6.17 pode ser observado que a forma de onda é alterada em função da carga indutiva, mostrando que neste caso foram necessárias novas relações de sincronismo. Isso corresponde à necessidade de alterar os períodos de carregamento e descarga do indutor, alterando o ponto de acionamento para formação da onda.

Para avaliar o nível de distorção na onda obtida pelo processo de aproveitamento transiente e sincronismo da frequência de chaveamento, foi extraído o total de distorção harmônica presente na corrente de saída do conversor. Para isso foi aplicado um bloco THD do *Simulink*, resultando no gráfico apresentado na Figura 6.18, que descreve um valor de aproximadamente 23,85%.

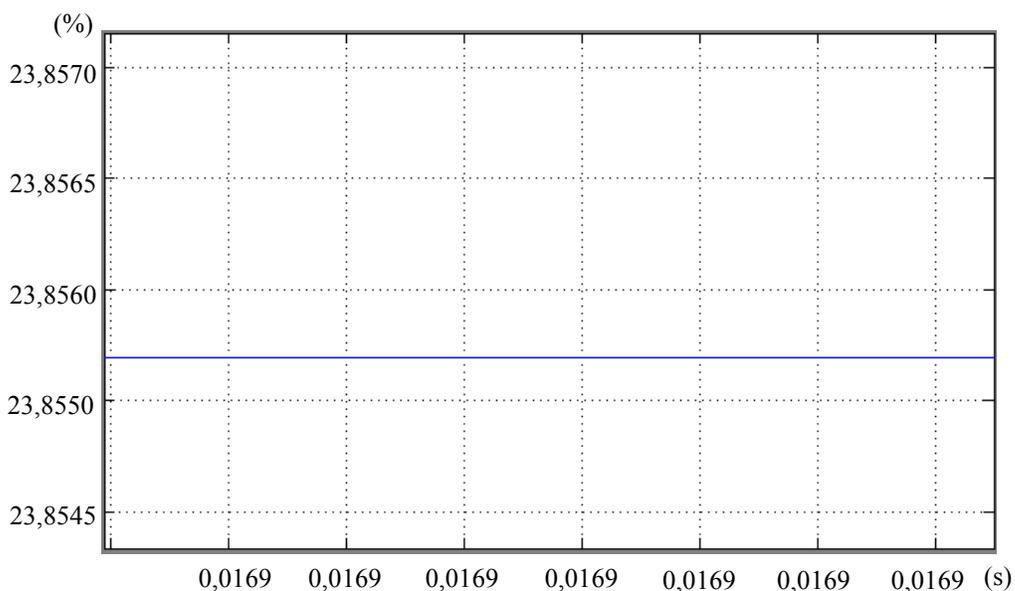


Figura 6.18 – Gráfico de distorção harmônica na corrente do conversor.

Complementando a análise, foi extraída a forma de onda da corrente no ponto correspondente à saída do elevador de tensão e entrada do inversor, conforme apresentado na Figura 6.19, que descreve o baixo nível de distorção introduzido por esse método de aproveitamento e sincronismo.

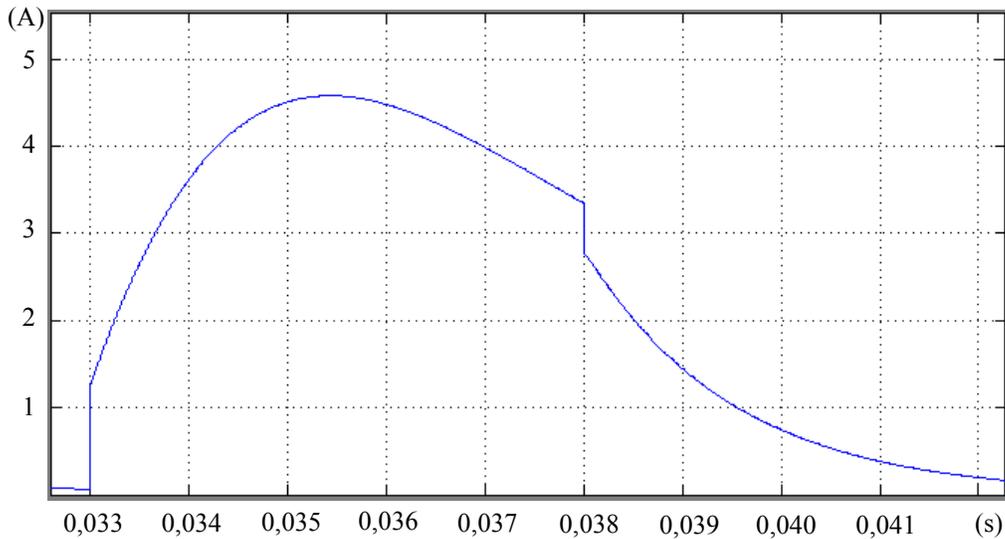


Figura 6.19 – Onda de corrente entre a saída do elevador e a entrada do inversor.

7- Protótipos e medições

7.1- Conversor de potência

Procurando estabelecer uma avaliação prática das soluções idealizadas e simuladas, foi construído um circuito protótipo do conversor de potência proposto. O protótipo apresentado nas Figuras 7.1 e 7.2 sintetiza a topologia do circuito aplicado nas simulações, em escala reduzida, utilizando um microcontrolador PIC 16F628A no gerenciamento dos pulsos de sincronismo. Para funcionamento do conversor, foi desenvolvido um programa de sincronismo, que foi gravado no microcontrolador e é apresentado no Anexo C. Esse programa opera definindo intervalos, frequência e pontos de chaveamento do conversor.

As medições foram efetuadas utilizando um osciloscópio digital WaveJet 332A, uma fonte Hayama de 12V com 1,2A.

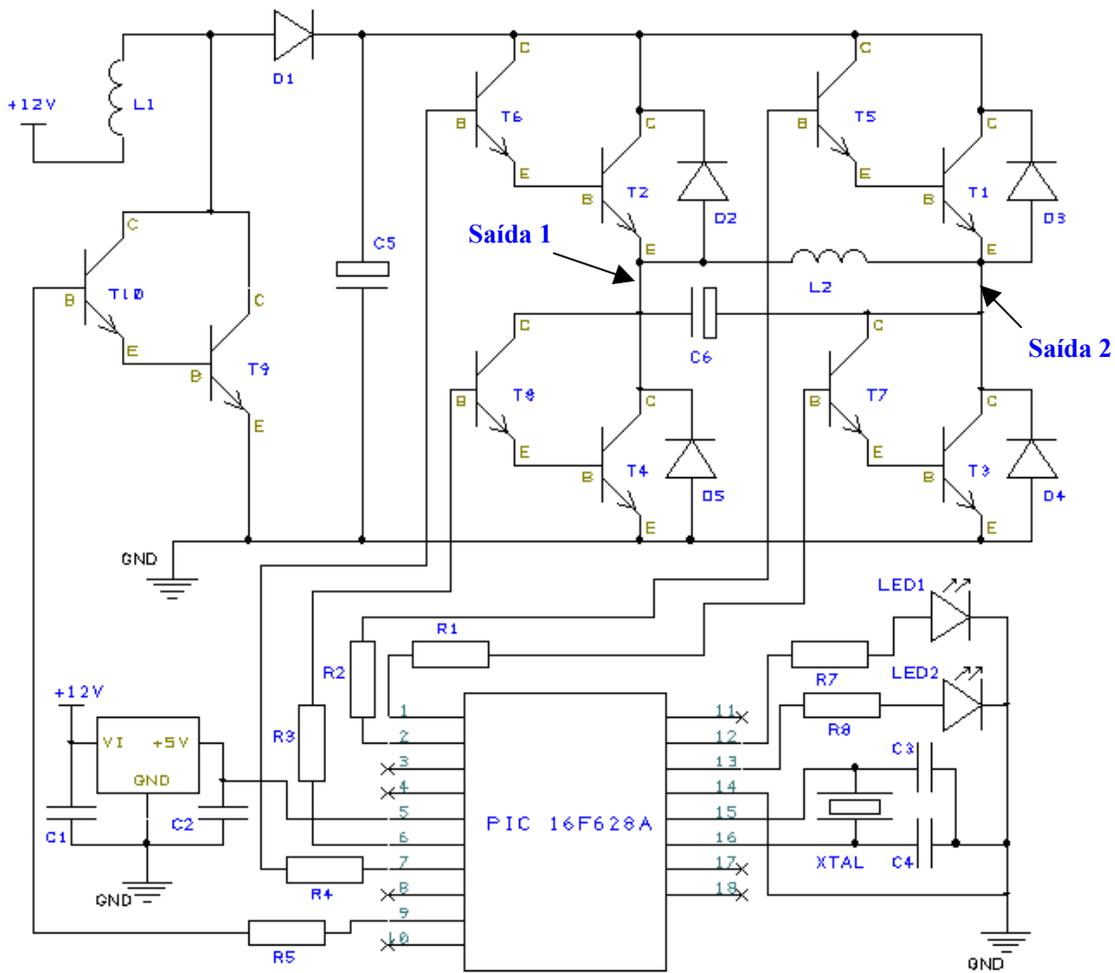


Figura 7.1 – Esquema eletrônico do protótipo de conversor.

Tabela 7.1 – Lista de componentes do protótipo de conversor.

Componente	Tipo	Valor	Unidade
XTAL	Oscilador	4	MHz
C1	Capacitor cerâmico	33	nF
C2	Capacitor cerâmico	10	nF
C3, C4	Capacitor de poliéster	22	pF
T1, T2, T3, T4, T9	Transistor BD138		
T5, T6, T7, T8, T10	Transistor BC337		
R1, R2, R3, R4, R5	Resistor de 1/8W	10	K Ω
R6, R7	Resistor de 1/8W	390	Ω
C5, C6	Capacitor eletrolítico	4700	μ F
L1, L2	Indutor	100	mH
D1, D2, D3, D4, D5	Diodo 1N4004		

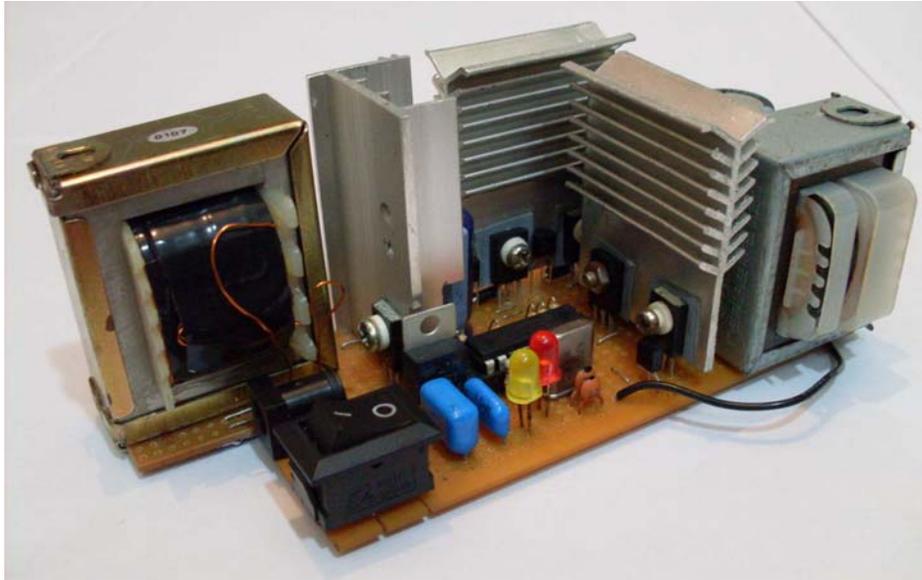


Figura 7.2 – Protótipo de conversor de potência.

Para visualizar a forma de onda no sinal de saída do conversor foram feitas medições com o osciloscópio e gerados gráficos. Inicialmente foi medido o sinal gerado sem a utilização de filtros e a forma da onda obtida com o protótipo de conversor é apresentada na Figura 7.3, operando na frequência de 17 Hz. Essa frequência foi selecionada por expressar melhor as características do sinal obtido com o protótipo.

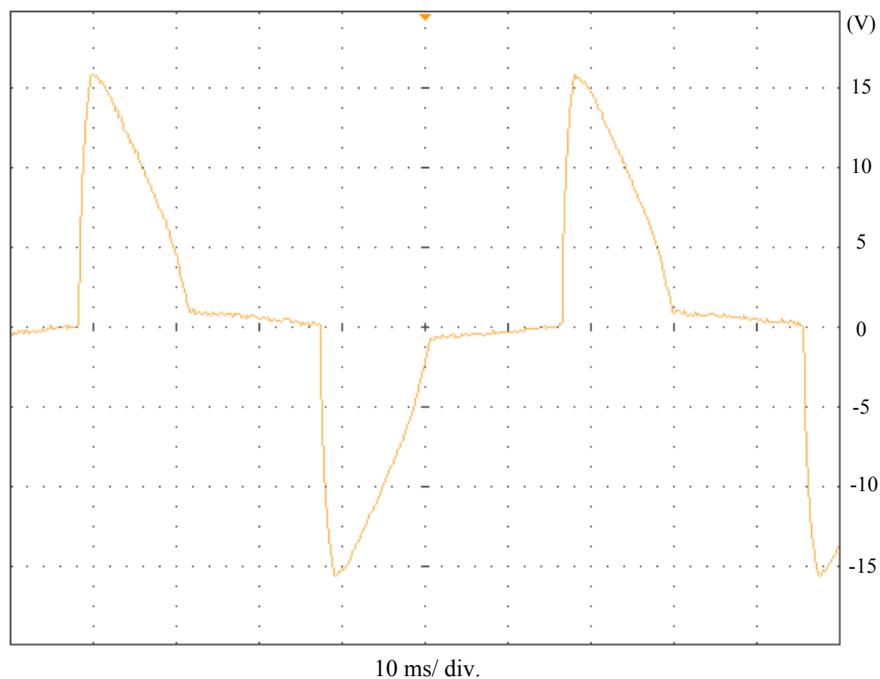


Figura 7.3 – Forma de onda na saída do conversor sem filtro.

Com o gráfico da Figura 7.3 é observado o degrau gerado na formação da onda, o que está relacionado com as grandes perdas geradas em circuito de pequena escala, que são intensificados à medida que o porte do circuito diminui. Essas perdas são geradas principalmente pela resistência associada ao indutor, que se torna considerável nas condições de pequeno porte. Isso provoca a necessidade de muitas espiras para gerar a tensão adequada no indutor e a utilização de um fio de bitola fina, para que o grande número de espiras caiba no carretel do indutor. Porém, com esse resultado são constatados os processos de elevação da tensão, geração dos pulsos e inversão.

Procurando complementar a análise do protótipo construído, foi confeccionado o gráfico da Figura 7.4, que apresenta a medição do sinal de tensão no indutor do conversor elevador de tensão.

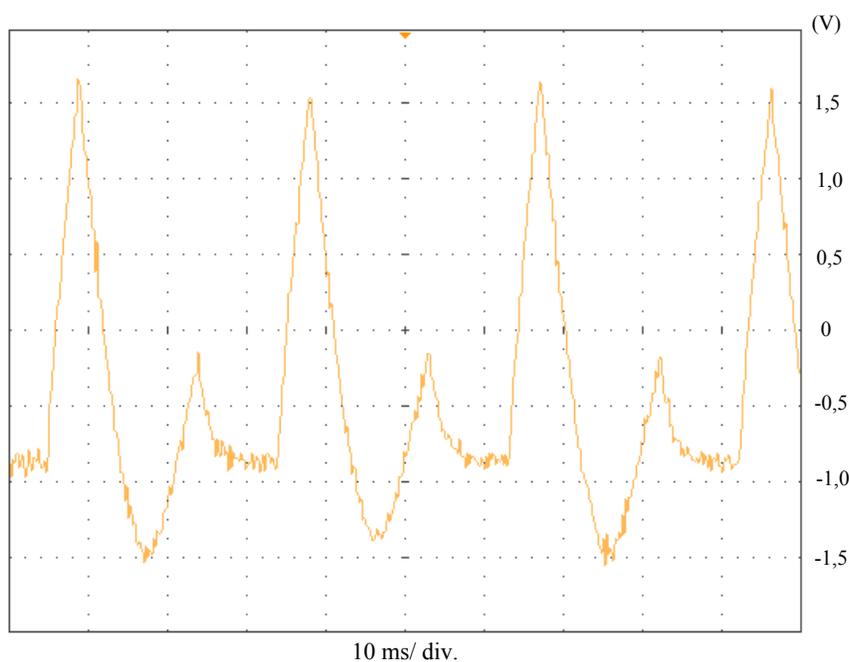


Figura 7.4 – Pulsos de tensão no indutor do elevador de tensão.

Procurando melhorar a construção do sinal de saída para o conversor proposto, foi introduzido um capacitor com elevada capacitância na saída do conversor, para atuar como filtro na tensão gerada. O resultado obtido é apresentado na Figura 7.5.

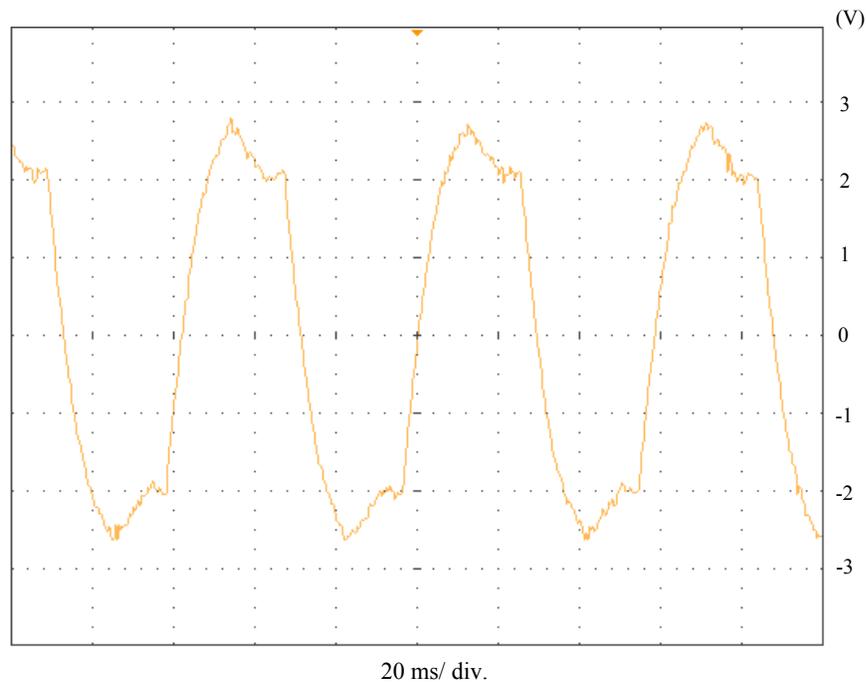


Figura 7.5 – Gráfico de tensão na saída do conversor com filtro.

Com base nos gráficos da Figura 7.5 foi observado que a colocação do capacitor como filtro na saída do conversor proporciona uma onda senoidal quase perfeita, porém, também provoca uma queda de tensão considerável. Essa redução na tensão de saída é ocasionada principalmente por dois fatores. O primeiro é a resistência existente no capacitor, que aumenta a necessidade de corrente para manter a tensão no mesmo valor. O segundo está relacionado com o enrolamento do indutor do elevador de tensão, que atua limitando a corrente de saída no conversor, uma vez que o indutor confeccionado é de pequeno porte e possui um fio com bitola relativamente fina. Com esse resultado foi constatada a sensibilidade do conversor ao efeito de escala, mostrando que a configuração proposta funciona, porém, é influenciada pela dimensão dos seus componentes básicos.

Para visualizar a intensidade dos harmônicos presentes na onda resultante foi utilizada a função matemática do osciloscópio e extraída a transformada rápida de Fourier. O resultado da transformada discreta de Fourier é apresentado no espectro de frequências da Figura 7.6, mostrando a pequena amplitude do primeiro e segundo harmônicos em relação a fundamental.

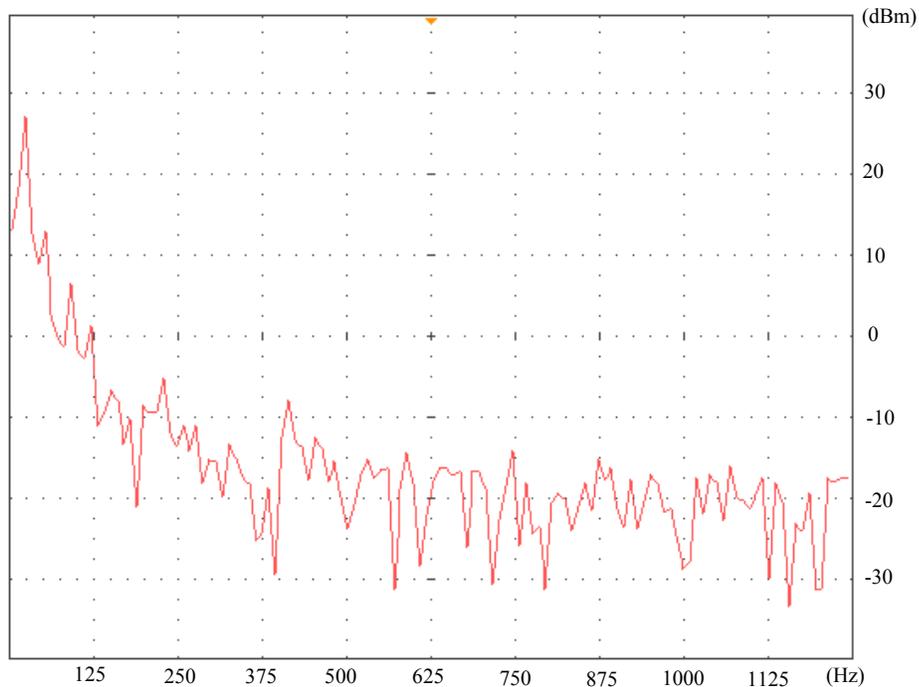


Figura 7.6 – Espectro de frequências da onda de saída no conversor.

Com base no gráfico da Figura 7.6 é confirmada a pouca quantidade de harmônicos presentes na onda gerada pelo conversor. Com esse gráfico também é constatada a pequena amplitude dos primeiros harmônicos, assim como a rápida diminuição do espectro em baixas frequências.

7.2- Controlador de potência

Para testar e comprovar as soluções propostas para interação de um pequeno banco de baterias com a Pilha a Combustível, foi construído um circuito protótipo para controlar a potência fornecida por meio da interação de uma bateria. Nesse protótipo a demanda de potência é avaliada através de medições de corrente na carga, permitindo ao microcontrolador PIC 16F877A definir qual o tipo de interação ocorrerá no sistema. O protótipo apresentado nas Figuras 7.7 e 7.8 executa avaliações de carga nula, alta demanda e condições normais de potência. Com esses parâmetros de avaliação o circuito define interações de carregamento, descarga ou desligamento da bateria no sistema, respectivamente, conforme a lógica de programação apresentada no Anexo C.

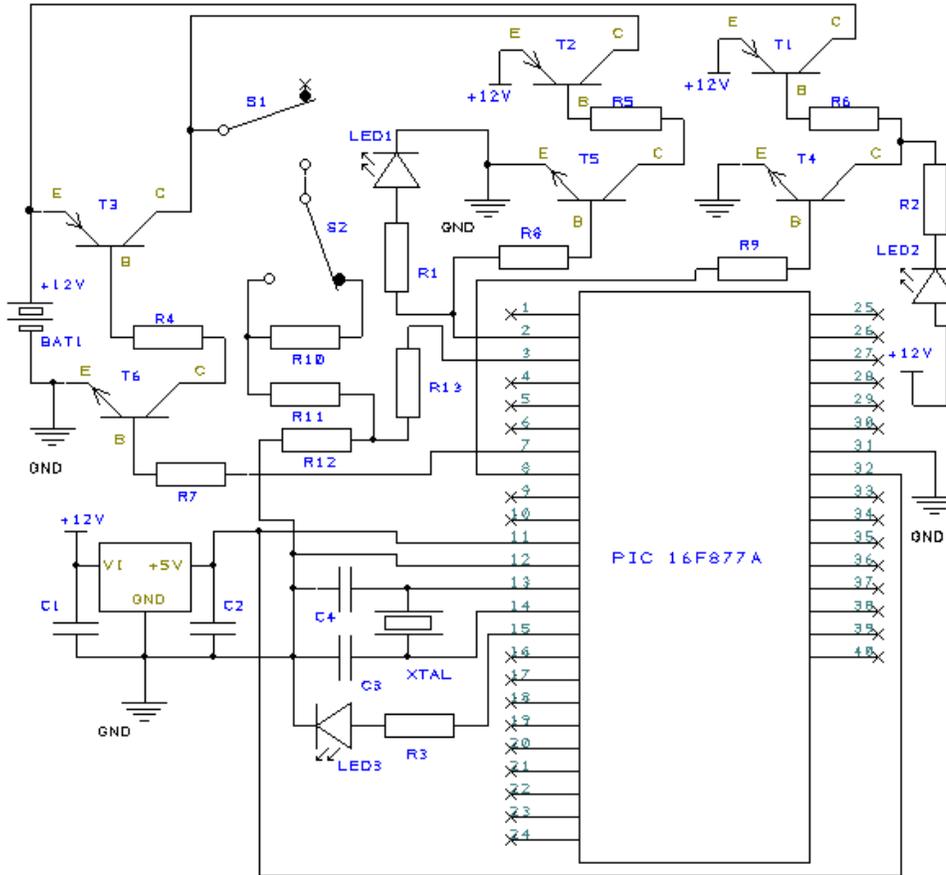


Figura 7.7 – Esquema eletrônico do gerenciador de potência.

Tabela 7.2 – Lista de componentes do gerenciador de potência.

Componente	Tipo	Valor	Unidade
XTAL	Oscilador	4	MHz
C1	Capacitor cerâmico	33	nF
C2	Capacitor cerâmico	10	nF
C3, C4	Capacitor de poliéster	22	pF
T1, T2, T3	Transistor BD137		
T4, T5, T6	Transistor BC337		
R1, R2, R3	Resistor de 1/8W	390	Ω
R4, R5, R6	Resistor de 1/8W	10	K Ω
R7, R8, R9	Resistor de 1/8W	4,7	K Ω
R10	Resistor de 4W	137	Ω
R11	Resistor de 4W	15	Ω
R12	Resistor de 4W	11	Ω
R13	Resistor de 1/8W	1	K Ω

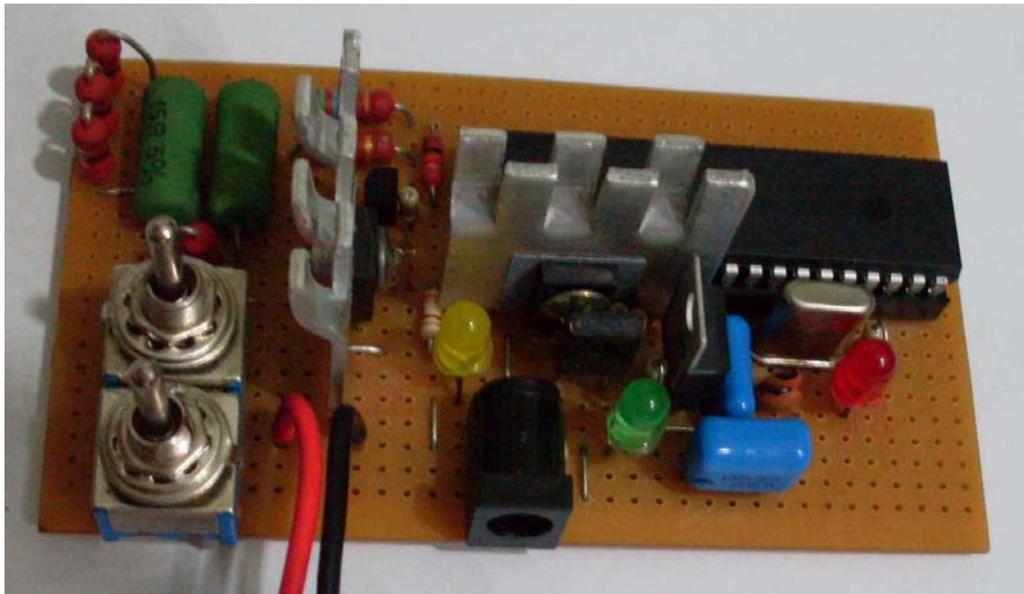


Figura 7.8 – Protótipo do controlador de potência.

As variações na demanda de potência do circuito são proporcionadas por meio de mudanças na associação de resistores, que provoca alterações na corrente consumida. As medições de corrente são efetuadas através de um desvio de tensão para um resistor Shunt, que opera como um sensor enviando o sinal de tensão para o microcontrolador. Para o funcionamento do circuito foi desenvolvida uma programação de gerenciamento de potência. Essa programação opera o microcontrolador processando o sinal de tensão e convertendo em corrente, definindo faixas de operação para tomada de decisão no gerenciamento da potência. No microcontrolador foi utilizado um conversor analógico-digital de 10 bits, descartando os 2 primeiros bits menos significativos para evitar a captação de ruídos ou pequenas alterações de comportamento.

Para avaliação da resposta fornecida pelo circuito as mudanças na demanda de potência, os sinais de tensão na carga e na bateria foram medidos com um osciloscópio digital WaveJet 332A, uma fonte Hayama de 12V com 1,2A e uma bateria Rontek RT12-08 de 12V com 0,8Ah. Os gráficos apresentados nas Figuras 7.9 e 7.10 mostram os sinais de tensão em algumas situações de variação na carga.

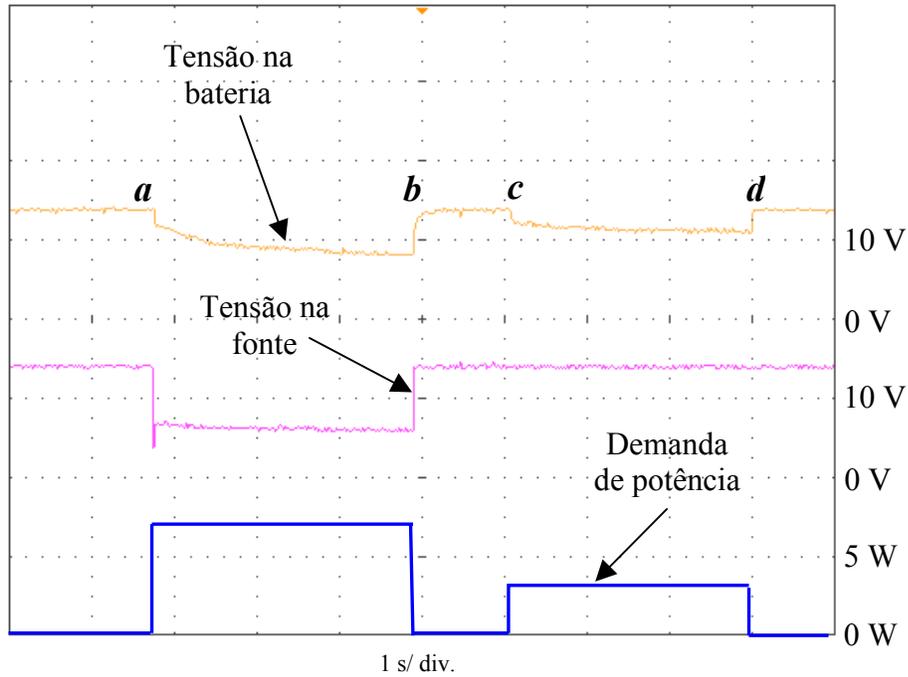


Figura 7.9 – Seqüência 1 de variação da tensão na fonte e na bateria.

O gráfico da Figura 7.9 mostra a condição de carga nula até o ponto *a*, onde ocorre a recarga da bateria, seguida pela condição de alta carga até o ponto *b*. A partir desse ponto é retomada a condição de carga nula, seguida por uma condição de pouca carga no ponto *c*. Essa seqüência de variação termina com o retorno a condição de carga nula no ponto *d*.

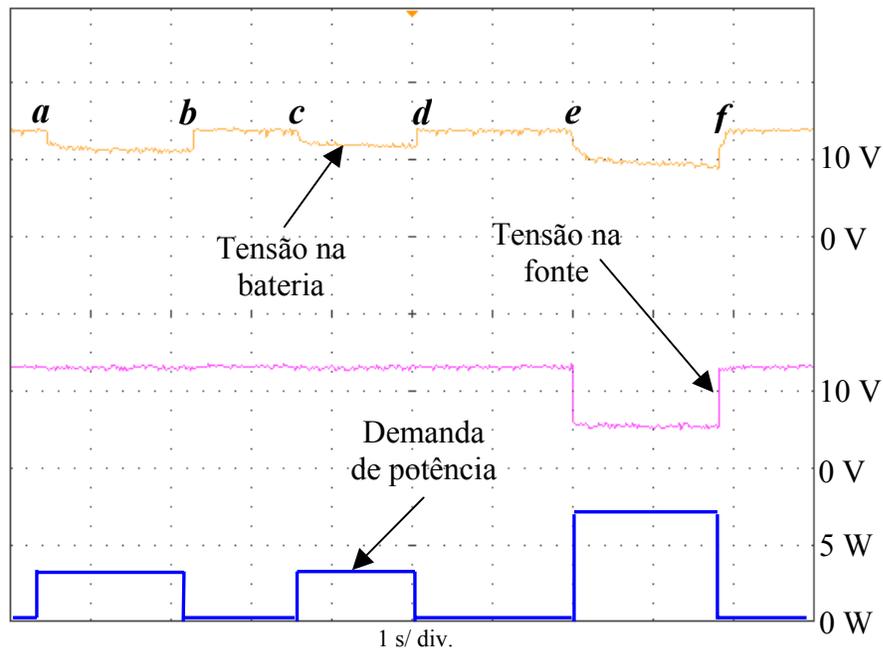


Figura 7.10 – Seqüência 2 de variação da tensão na fonte e na bateria.

O gráfico da Figura 7.10 mostra a condição de carga nula até o ponto *a*, onde a etapa de pouca carga permanece até o ponto *b*, seguido pelo retorno a condição de carga nula até o ponto *c*. Nesse ponto é aplicada uma condição de pouca carga, que vai até o ponto *d*, retornando a uma situação de carga nula até o ponto *e*, onde é iniciada uma condição de alta carga, que vai até o ponto *f*, seguido por uma situação de carga nula.

Por meio dos gráficos das Figuras 7.9 e 7.10 pôde ser observada a variação de tensão que é absorvida pela bateria, garantindo que a fonte principal seja preservada em condições normais de carga. Porém, em condições críticas de carga é gerado um degrau na tensão da fonte principal, mostrando que o valor da carga foi superior à capacidade da bateria de repor a potência. Com isso, é constatada a eficácia do controle previsto, direcionando as características dinâmicas da demanda de potência para bateria.

Para ampliar a análise do circuito foi medida a corrente na carga, juntamente com a tensão na fonte, testando as condições de variação na demanda de potência, conforme apresentado nas Figuras 7.11 e 7.12.

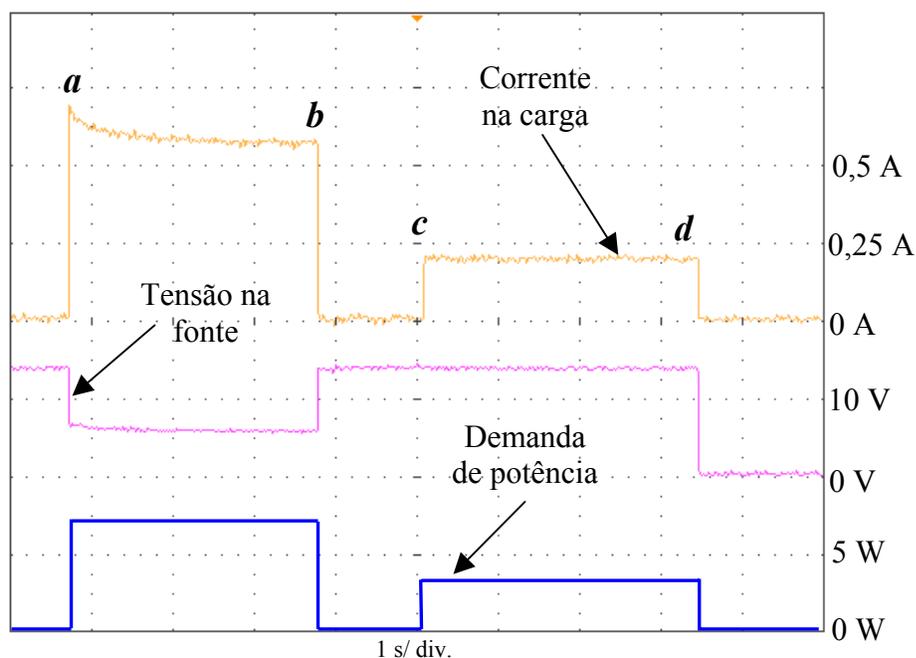


Figura 7.11 – Sequência 1 de variação da tensão na fonte e corrente na carga.

O gráfico da Figura 7.11 mostra a condição de carga nula até o ponto *a*, onde inicia uma fase de alta carga até o ponto *b*, seguida por uma condição de carga nula até o ponto *c*. Nesse ponto é iniciada uma condição de pouca carga até o ponto *d*, seguido pelo desligamento do controle. Esse resultado confirma a observação de que a condição de pouca carga (entre *c* e *d*) não influencia a tensão na bateria, mostrando que essa estabilidade para condições normais fica definida pelo dimensionamento da bateria e da fonte principal.

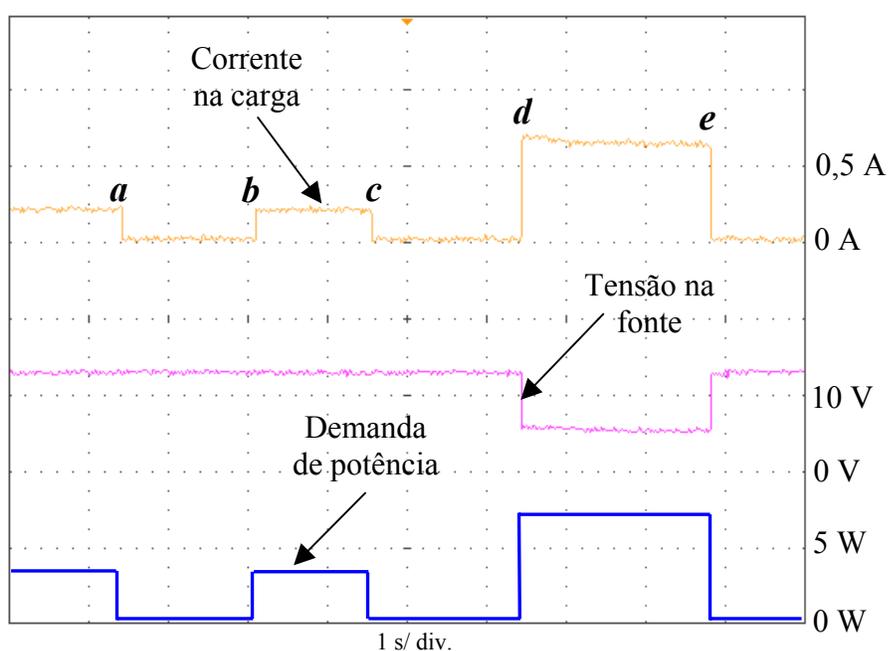


Figura 7.12 – Seqüência 2 de variação da tensão na fonte e corrente na carga.

O gráfico da Figura 7.12 mostra a condição de pouca carga até o ponto *a*, onde inicia a etapa de carga nula até o ponto *b*, seguido pelo retorno a condição de pouca carga até o ponto *c*, onde é retomada a situação de carga nula, que permanece até o ponto *d*. Nesse ponto é iniciada a condição de alta carga, que vai até o ponto *e*, seguido pela condição de carga nula.

As seqüências de variações de cargas apresentadas nos gráficos das Figuras 7.11 e 7.12 mostram que em condições normais de operação o sistema mantém adequadamente a tensão na fonte principal, garantindo a estabilidade e preservando a fonte da seqüência de

oscilações na corrente. Porém, em condições críticas de carga a fonte principal é afetada e ocorre uma queda profunda na tensão, conforme esperado, o que é uma característica do dimensionamento dos componentes principais, como fonte, baterias e cargas.

Para expandir a análise do sistema de balanceamento foram confeccionados os gráficos apresentados nas Figuras 7.13 e 7.14, que mostram situações com variações de corrente na carga juntamente com as variações de tensão na bateria. Essas variações permitem avaliar o comportamento da bateria em função das oscilações de carga.

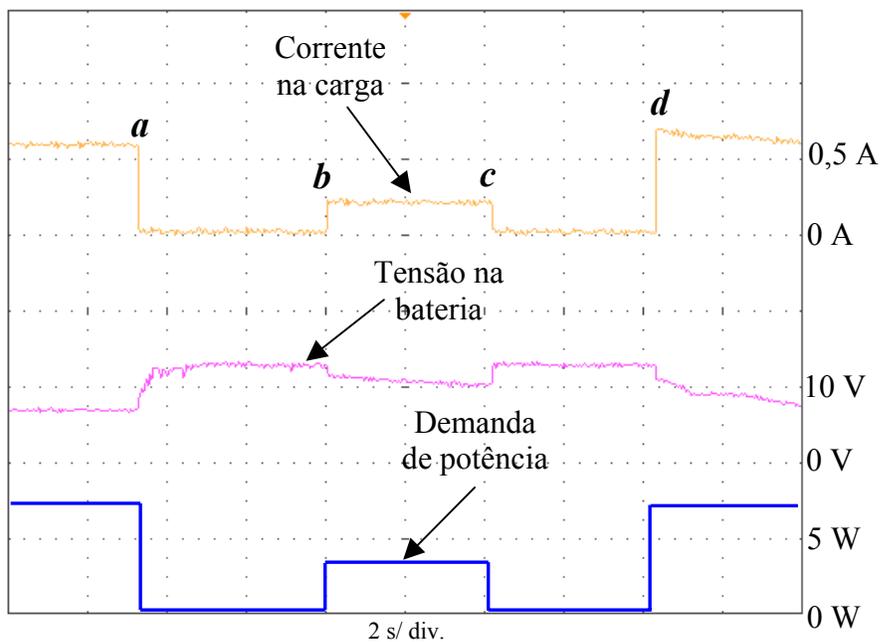


Figura 7.13 – Seqüência 1 de variação da tensão na bateria e corrente na carga.

O gráfico da Figura 7.14 mostra a condição de alta carga até o ponto *a*, onde é iniciada a etapa de carga nula até o ponto *b*, seguido pela condição de pouca carga até o ponto *c*, retomando a condição de carga nula até o ponto *d*. Nesse ponto é reiniciada a condição de alta carga.

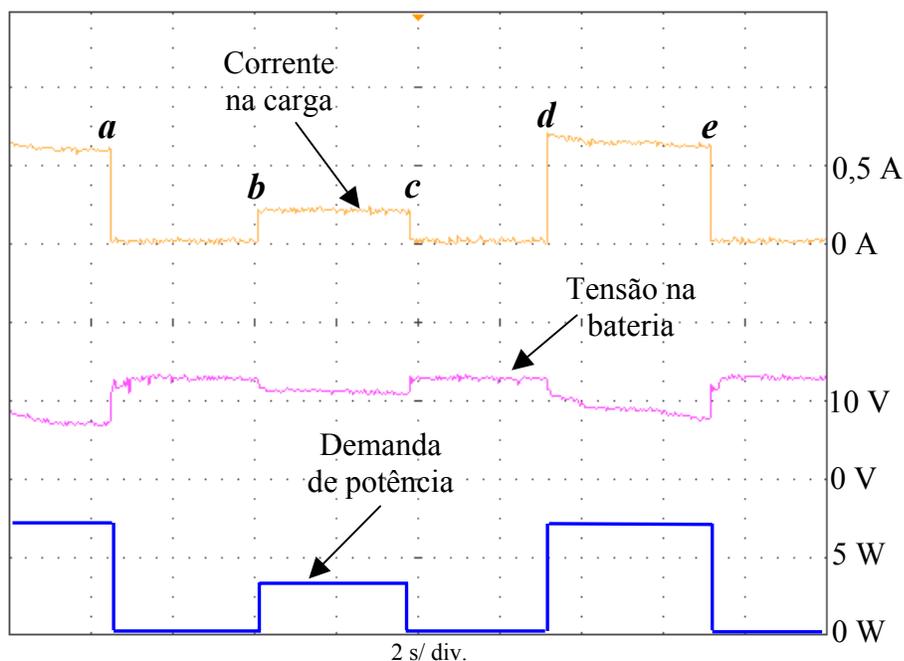


Figura 7.14 – Seqüência 2 de variação da tensão na bateria e corrente na carga.

O gráfico da Figura 7.14 mostra a condição de alta carga até o ponto *a*, onde é iniciada a situação de carga nula, que vai até o ponto *b*, seguido pela condição de pouca carga até o ponto *c*. Nesse ponto é retomada a situação de carga nula até o ponto *d*, onde é iniciada a etapa de alta carga, que vai até o ponto *e*, seguido pela etapa de carga nula.

Por meio dos gráficos das Figuras 7.13 e 7.14 pôde ser observada a atuação da bateria absorvendo as variações de carga, com o objetivo de preservar a fonte principal, conforme previsto na proposta desse trabalho.

8- Discussão

Com a aplicação dos Algoritmos Genéticos os resultados obtidos no capítulo 5 apresentaram um enquadramento muito satisfatório para determinação dos parâmetros de operação de PaC, com base na seqüência de operações genéticas apresentada na Figura 5.5. Os AGs configuram uma ferramenta bastante útil para esse tipo de sistema, que é caracterizado por ser uma estrutura multivariável e com comportamento extremamente não-linear. Nesse caso, os AGs atuam de forma eficiente na orientação dos melhores parâmetros

de operação a serem utilizados na operação da PaCOS. Isso mostra a coerência com o trabalho apresentado por ANG *et al.* [32], o qual ressaltou a importância de otimização dos parâmetros de operação em PaCs e seus resultados na definição de configurações na produção de energia.

Para avaliação dos parâmetros genéticos utilizados foram confeccionados dois gráficos de evolução genética das soluções (Figuras 5.6 e 5.7), mostrando a influência da diversidade populacional no processo de evolução com AG. Com esses gráficos foi constatado que no caso em que as operações genéticas ocorrem com uma população pequena, resultam em uma evolução pouco gradativa, com o risco de não ser encontrada uma solução desejada, pois falta diversidade de valores do processo que permitam ampliar a região de busca das possíveis soluções.

Os patamares de aptidão apresentados nos gráficos das Figuras 5.6 e 5.7 mostram que em determinadas etapas do processo de evolução um indivíduo (ou solução) predomina como mais apto durante duas ou mais gerações. Nesse processo, mesmo com a evolução da aptidão média da população um indivíduo se mantém como mais apto durante algumas gerações, o que mostra a pequena região no espaço de soluções.

Como os AGs relacionam métodos de avaliação que independem da unidade aplicada e tendo em vista a não-linearidade de comportamento das PaCs, foi constatada a necessidade de impor limites para variação dos parâmetros de operação da PaC. Essas restrições tiveram como objetivo impedir que o algoritmo considere valores de soluções que na realidade não são factíveis na prática ou simplesmente estão fora dos objetivos do projeto. Também foi observado que a aplicação de AG complementa a síntese de modelagem e simulação de PaC, permitindo uma orientação valiosa sobre os valores de operação para um nível de potência desejado, o que era obtido anteriormente através de métodos experimentais.

Esses resultados estão em concordância com o trabalho apresentado por BUNIN *et al.* [62], que realizou uma validação experimental para uma estratégia de otimização para uma PaCOS, que permite encontrar interativamente as condições ótimas de operação. Com esse trabalho foi constatada a sensibilidade para distúrbios na variação de carga, principalmente descritos na dificuldade de mudanças no fluxo de gases, que provocam

baixa utilização de combustível. Porém, foi observado que as restrições impostas nesse trabalho limitam a aplicação da metodologia.

Com base nos gráficos de simulação da estrutura de controle proposta, foi observada uma boa capacidade de resposta dinâmica da demanda, balanceando adequadamente as variações de potência de forma gradativa, evitando variações muito intensas de potência. Nesse processo foi constatado que ao trabalhar com um banco de baterias complementando a potência fornecida é acrescentada a vantagem de operar a PaC em um ponto estacionário de funcionamento, sem ter que alterar ou ajustar os parâmetros de operação. Essa necessidade foi constatada no trabalho de SORRENTINO *et al.* [25], mostrando o stress térmico gerado nas condições com pico na demanda de potência, que provocam uma diferença entre a potência produzida e a fornecida, assim como variações intensas na temperatura do equipamento. Porém, a metodologia aplicada nesse trabalho demonstrou a pouca capacidade de assegurar a eficiência na produção de energia.

Para permitir uma melhor análise dos resultados obtidos na simulação foi confeccionado um gráfico de potência da Figura 8.1, que associa os três sinais de avaliação do sistema, definidos como demanda, produção e balanceamento com as baterias.

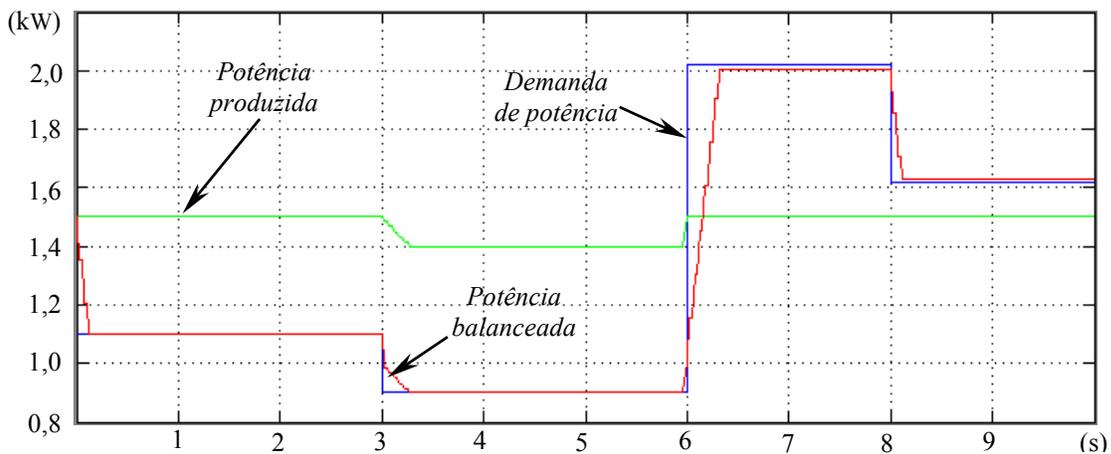


Figura 8.1 – Gráfico dos parâmetros de avaliação da potência no sistema para condição 1.

A diferença existente entre as curvas de demanda e balanceamento fica evidente no gráfico da Figura 8.1, presente nos momentos de resposta a mudança de consumo, que foi introduzida propositalmente para simular os atrasos de identificação e processamento, assim como o atraso existente na resposta de um sistema de potência. No caso da

recirculação, o atraso introduzido está relacionado com a demora de resposta dos gases, juntamente com o atraso no processamento eletroquímico da nova concentração.

Através dessa configuração, que permite a operação em regime estacionário, foi constatado que além do aumento na eficiência do sistema de produção de energia, a potência consumida no sistema auxiliar fica facilmente mensurável. Isso ocorre porque todos os seus componentes estão em um ponto fixo de operação e consumo, permitindo até processos de otimização na operação. Com o regime estacionário de operação da PaC são evitados os descompassos gerados pelos diferentes períodos de resposta dinâmica nos subsistemas do BdP, considerando a diferença de resposta entre os sistemas de gases, eletroquímico, eletromecânico e elétrico.

Ao utilizar um ponto de operação estacionário no funcionamento da PaC também é eliminada a necessidade de uma série de interações de controle, que são necessárias para acionar e gerenciar os diversos componentes relativos ao sistema auxiliar. Essa metodologia também promove uma economia considerável em termos de processamento de controle, tendo em vista que agora o sistema de controle não terá que processar funções eletroquímicas. Essas funções estão associadas com respostas térmicas, procurando equilibrar uma demanda elétrica, o que inevitavelmente consome tempo de resposta e agrega complexidade ao sistema de controle.

Para ampliar a visualização do comportamento nas condições críticas simuladas, foram associados os parâmetros de análise da potência, mostrando de forma combinada as diferenças na resposta dinâmica, conforme apresentado na Figura 8.2.

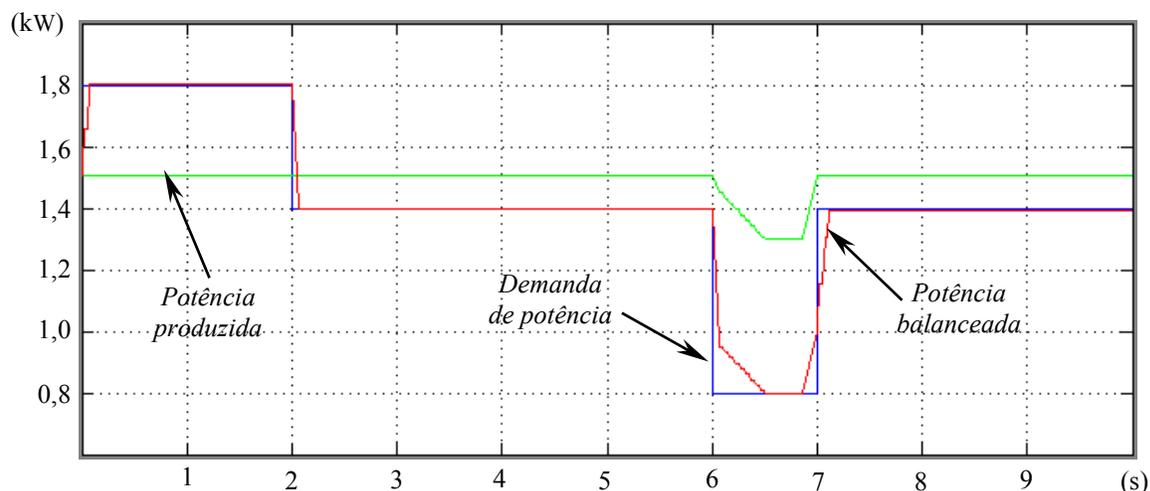


Figura 8.2 – Gráfico dos parâmetros de avaliação da potência no sistema para condição 2.

Na segunda simulação foi aplicada uma queda de demanda mais intensa e mais aguda, mostrando a resposta do sistema com auxílio da recirculação e uma diferença maior entre a demanda e o balanceamento.

Analisando os resultados obtidos juntamente com os conceitos obtidos no processo de pesquisa foi alcançada uma constatação importante, relacionada com influência do Bdp no processo de degradação da PaC. Ou seja, foi constatado que quanto menor a capacidade de ajuste dinâmico do Bdp, maior é a intensidade de degradação da PaC, o que é provocado pela diferença entre a demanda e a potência fornecida. Com uma avaliação próxima, o trabalho apresentado por FERRARI *et al.* [27] analisou os distúrbios gerados na PaCOS em função de variações na carga, considerando diversos parâmetros relacionados a operação da PaCOS, procurando atenuar os distúrbios críticos na geração de potência. Esse trabalho mostrou as oscilações geradas nos principais parâmetros da PaCOS provocados por distúrbios na carga, e assim, mostrando a importância de evitar a incidência dessas grandes variações diretamente sobre a PaCOS. A metodologia demonstrou a dificuldade para ajustar os diversos parâmetros de funcionamento da PaCOS, o que representou uma limitação.

Os resultados obtidos com os protótipos mostram que a proposta do trabalho foi confirmada, tanto na conversão de potência como para o balanceamento na demanda de potência. Esses resultados mostraram que o conteúdo idealizado, modelado e simulado nesse trabalho é factível e viável para condições de geração distribuída. Os dados obtidos com os protótipos também mostraram que os processos de simulação estabelecidos forneceram respostas coerentes com a realidade, conforme o gráfico apresentado na Figura 8.3.

Por meio dos gráficos do item 7.1 foi observado que é possível aproveitar os pulsos de tensão gerados no elevador de tensão para construir uma onda senoidal na saída do conversor. Apesar das perdas, o protótipo mostra que essa técnica é viável e agrega muitos benefícios ao processo de conversão na área de geração distribuída. Com o protótipo foi constatada a influência da resistência associada ao indutor do elevador de tensão no processo de geração de pulsos, o que acarreta em perdas na construção da onda.

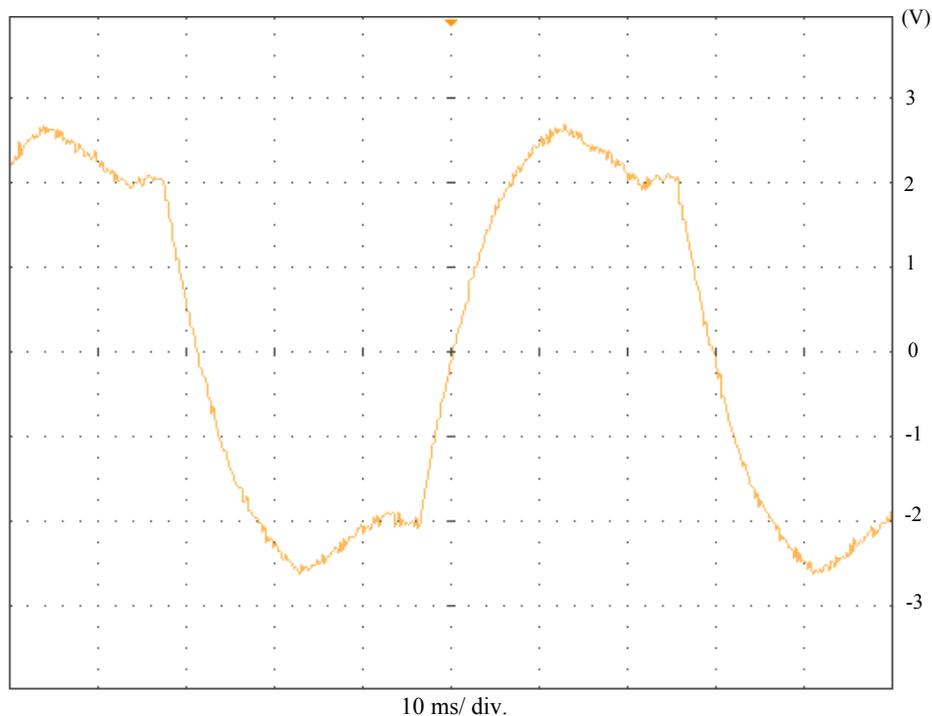


Figura 8.3 – Gráfico ampliado da tensão na saída do conversor com filtro.

Com a construção desse pequeno conversor foi observada a influência do efeito de escala no sistema de conversão, o que viabiliza a construção de conversores para maior potência. Também foi constatado que o conversor proposto não possui a desvantagem existente no conversor ressonante, descrita pela necessidade de um indutor com grande dimensão, que ocorre em função da operação ser regida por parâmetros dimensionais, conforme descrito por LUO e YE [12]. Como a formação da onda no conversor proposto é feita em duas etapas, é explorada a capacidade máxima do indutor, reduzindo consideravelmente a dimensão exigida para esse componente, o que possibilita a redução no volume e custo do equipamento.

Com a montagem do protótipo do item 7.2 foi constatado que é possível administrar a potência fornecida utilizando um pequeno banco de baterias como fonte complementar de potência. Foi observado que com essa configuração é possível absorver solicitações dinâmicas com o banco de baterias e manter a fonte principal operando em regime

estacionário, conforme apresentado nas Figuras 8.4, 8.5 e 8.6. Esse plano de operação é extremamente favorável para Pilhas a Combustível, pois elas possuem um complicado ajuste de parâmetros em condições dinâmicas de potência. Também foi observada a importância do dimensionamento dos componentes principais desse sistema (fonte, bateria e carga) para que o balanceamento seja mais adaptável em condições críticas de carga.

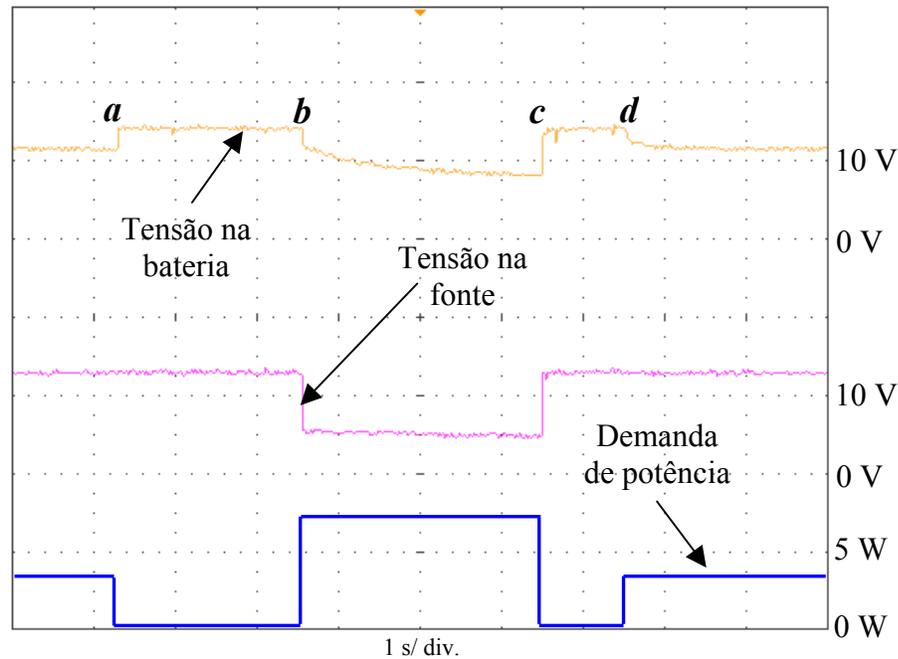


Figura 8.4 – Seqüência de variação da tensão na fonte e na bateria.

O gráfico da Figura 8.4 mostra a condição de pouca carga até o ponto *a*, seguido por uma condição de carga nula até o ponto *b*, onde inicia a condição de alta carga, que vai até o ponto *c*. A partir desse ponto é retomada a etapa de carga nula até o ponto *d*, seguida por uma etapa de pouca carga.

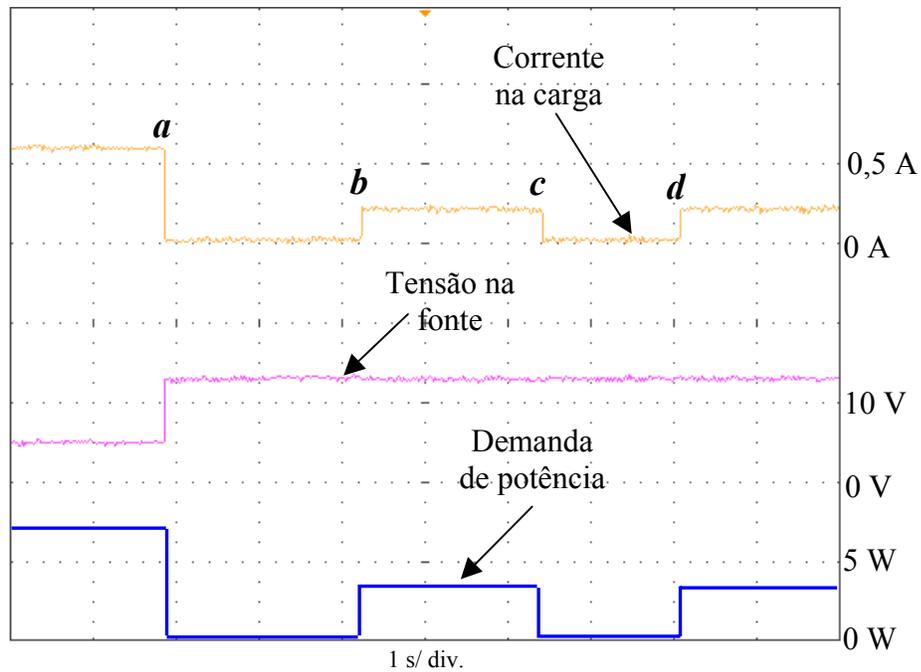


Figura 8.5 – Seqüência de variação da tensão na fonte e corrente na carga.

O gráfico da Figura 8.5 mostra a condição de alta carga até o ponto *a*, onde é iniciada uma etapa de carga nula, que vai até o ponto *b*. Nesse ponto é aplicada uma condição de pouca carga, que permanece até o ponto *c*, seguido por uma situação de carga nula até o ponto *d*, onde é retomada a condição de pouca carga.

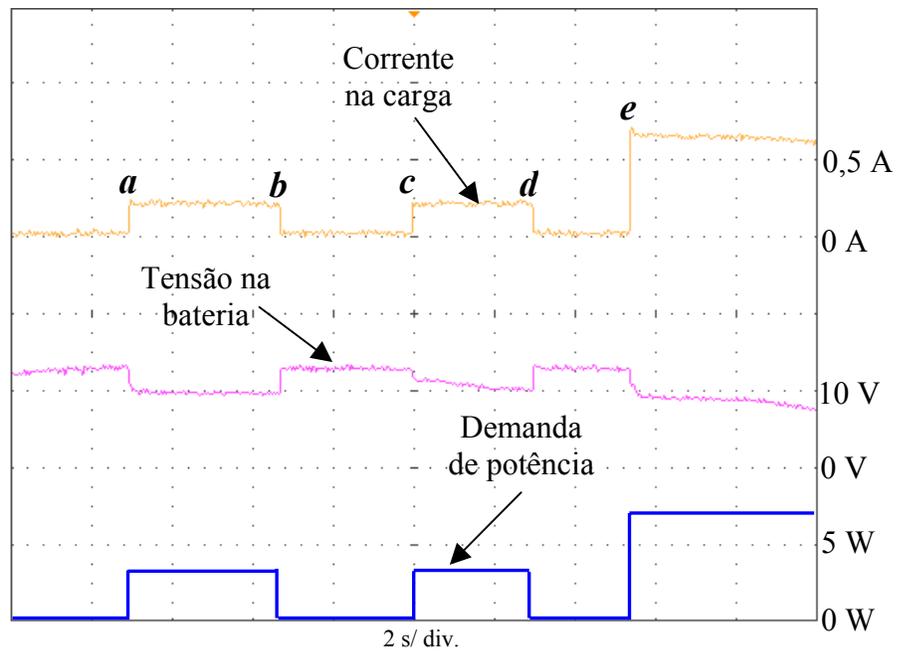


Figura 8.6– Seqüência de variação da tensão na bateria e corrente na carga.

O gráfico da Figura 8.6 mostra a condição de carga nula até o ponto *a*, seguido pela etapa de pouca carga até o ponto *b*, onde é retomada a condição de carga nula até o ponto *c*. Nesse ponto é aplicada novamente a condição de pouca carga até o ponto *d*, onde é reiniciada situação de carga nula até o ponto *e*, seguido por uma condição de alta carga.

Os gráficos de balanceamento da potência mostram que o sistema proposto funcionou conforme o esperado, agregando flexibilidade no fornecimento de potência ao mesmo tempo em que preserva a fonte principal (PaCOS) das solicitações dinâmicas de potência. Os resultados gráficos são semelhantes aos obtidos no trabalho apresentado por BUNIN *et al.* [62], que utilizou uma estratégia de otimização para minimizar a sensibilidade a distúrbios na demanda de potência. No trabalho de UZUNOGLU *et al.* [48] foi apresentada a capacidade das baterias de absorver picos na demanda de potência, descrevendo a baixa resposta dinâmica na PaCOS e a necessidade de um sistema auxiliar para armazenamento de energia. Da mesma forma, é possível observar que os resultados obtidos estão relativamente coerentes com os apresentados no trabalho de KIM *et al.* [15], que mostram a melhora na resposta dinâmica para o fornecimento de potência e a redução na necessidade de alteração no fluxo de gases da PaC.

Para mostrar a importância de usar uma segunda fonte de armazenamento de energia para assegurar a qualidade da potência fornecida, no trabalho de NAYERIPOUR *et al.* [13] foi desenvolvida uma estratégia de controle que busca aumentar a capacidade de resposta dinâmica da PaCOS em condições transientes. Essa metodologia utilizou supercapacitores conectados ao conversor de potência, para prevenir a baixa utilização de combustível e degradação de componentes. Porém, foi observada a dificuldade na administração da energia nos supercapacitores.

A estratégia de controle baseada em regime estacionário de operação da Pilha a Combustível automaticamente agrega um considerável aumento na vida útil dos componentes da Pilha a Combustível. Isso ocorre principalmente porque esses elementos não ficam submetidos aos processos de degradação gerados pela diferença entre a produção e demanda de energia. Com esse conjunto de técnicas também foi ampliada a eficiência na produção de potência, pois a operação em regime estacionário no ponto ótimo evita os desníveis de produção de potência e assegura uma maior geração de energia com menor consumo de combustível. Com a estratégia de controle proposta é possível produzir um

valor de potência com um menor volume de dispositivos, o que conseqüentemente influencia no custo do equipamento e no gasto com operação.

Com base nos gráficos de balanceamento simulados e os medidos nos protótipos, foi possível constatar a similaridade na atenuação de solicitações transientes na PaCOS, mostrando que tanto na avaliação computacional como na experimental o banco de baterias teve um papel importante no funcionamento da PaCOS. Nos dois casos foram observados os degraus de absorção e reposição na demanda de potência por meio das baterias, mostrando a importância da avaliação computacional e processos de simulação para prever soluções nessa área.

Com a pesquisa e desenvolvimento do conversor proposto foram constatadas as perspectivas e relevâncias alcançadas com essa solução, a qual não é abordada ou aproveitada nas literaturas mais conceituadas da área. Isso mostra que com esse conversor são abertas ótimas oportunidades para novos desenvolvimentos e segmentos de aperfeiçoamento utilizando esse princípio de operação, com objetivo no melhor tratamento e aproveitamento da energia produzida.

9- Conclusões

Com esse trabalho foi confirmado o benefício na proposta de aplicar um pequeno banco de baterias como fonte complementar de potência, que possibilita a operação em regime estacionário e agrega flexibilidade ao sistema para absorver solicitações dinâmicas na demanda de potência. Também foi constatado que a estratégia de controle baseada no regime estacionário automaticamente agrega um considerável aumento na vida útil dos componentes da Pilha a Combustível. Isso ocorre principalmente porque esses elementos não ficam submetidos aos processos de degradação gerados pela diferença entre a produção e demanda de energia.

Com o conjunto de técnicas apresentadas foi ampliada a eficiência na produção de potência, pois a operação em regime estacionário no ponto ótimo evita os desníveis na produção de potência, assegurando uma maior produção de energia com um menor consumo de combustível. Com a estratégia de controle proposta também é possível

produzir um valor de potência com um menor volume de dispositivos, o que conseqüentemente influencia no custo do equipamento e no gasto com operação.

Foi confirmada a proposta de utilizar o Algoritmo Genético como ferramenta de otimização na PaCOS, para determinação do ponto ótimo de operação estacionária, e assim, complementando a estratégia de controle adotada. Com a metodologia de aplicação do Algoritmo Genético foi constatado que a determinação prévia dos pontos de operação representa um diferencial na otimização do funcionamento de Pilhas a Combustível, eliminando o tempo de processamento computacional no ajuste de parâmetros de operação, o que seria inviável para um processamento de tempo real.

Com base nos resultados obtidos e na avaliação dos circuitos de potência foi confirmada a proposta de aproveitamento de processos transientes (carga e descarga dos elementos passivos), como metodologia para construção da onda senoidal na saída do conversor de potência. Essa metodologia também confirma a possibilidade de simplificar a configuração do circuito, minimizar a necessidade de filtros e conseqüentemente reduzir os custos e o volume do conversor.

10- Trabalhos futuros

A aplicação prática de todas as técnicas e métodos relacionados na estratégia de controle proposta, desenvolvendo o mapeamento do desvio entre os valores previstos na metodologia e os valores práticos em um sistema de escala real, considerando os pontos de melhor desempenho para o funcionamento de um sistema de Pilhas a Combustível.

O desenvolvimento de um estudo sobre a sensibilidade do conversor de potência proposto aos diversos distúrbios que podem existir em uma demanda de potência real. Nesse estudo serão mapeados os níveis de distorção na formação da onda e os métodos de prevenção e correção dessas distorções.

11- Referência Bibliográfica

- [1] CHAO, C., SHIEH, J., “A new control strategy for hybrid fuel cell-battery power systems with improved efficiency”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 17, pp. 13141-13146, 2012.
- [2] WU, X., ZHU, X., “Multi-loop control strategy of a solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 20, pp. 8444-8449, 2011.
- [3] SINGHAL, S. C., KENDALL, K., *High Temperature Solid Oxid Fuel Cell: Fundamentals, Design and Applications*, 1 ed. New York, Elsevier, 2003.
- [4] BAGOTSKY, V., *Fuel Cells Problems and Solutions*, 1 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2009.
- [5] BAE, J., LIM, S., HYUNJIN JEE, H., et al., “Small stack performance of intermediate temperature-operating solid oxide fuel cells using stainless steel interconnects and anode-supported single cell”, *Journal of Power Sources*, v. 172, n. 1, pp. 100–107, 2007.
- [6] SPIVEY, B. J., EDGAR, T. F., “Dynamic modeling, simulation, and MIMO predictive control of a tubular solid oxide fuel cell”, *Journal of Process Control*, v. 22, n. 8, pp. 1502-1520, 2012.
- [7] ZHANG, J., CHENG, H., WANG, C., “Technical and economic impacts of active management on distribution network”, *Electrical Power and Energy Systems*, v. 31, n. 2, pp. 130–138, 2009.
- [8] MASTERS, G., *Renewable and Efficient Eletric Power Systems*, 1 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2004.

- [9] HANNAN, M., MOHAMED, A., HUSSAIN, A., “Power quality analysis of STATCOM using dynamic phasor modeling”, *Electric Power Systems Research*, v. 79, n. 6, pp. 993-999, 2009.
- [10] DUGAN, R., MCGRANAGHN, M., SANTOSO, S., *Electrical Power Systems Quality*, 2 ed. New York, McGraw-Hill, 2004.
- [11] BROWN, R., *Electric Power Distribution Reliability*, 1 ed. New York, Marcel Dekker, 2002.
- [12] LUO, F., YE, H., *Advanced DC/DC Converters*, 1 ed. New York, CRC Press, 2004.
- [13] NAYERIPOUR, M., HOSEINTABAR, M., NIKNAM, T., “A new method for dynamic performance improvement of a hybrid power system by coordination of converter's controller”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 8, pp. 4033-4043, 2011.
- [14] FERNANDEZ, L. M., GARCIA, P., GARCIA, C. A., et al., “Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway” *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 5, pp. 2183-2192, 2011.
- [15] KIM, Y.B., KANG, S.J., “Time delay control for fuel cells with bidirectional DC/DC converter and battery”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 16, pp. 8792-8803, 2010.
- [16] TORREGLOSA, J.P., JURADO, F., GARCÍA, P., et al., “Hybrid fuel cell and battery tramway control based on an equivalent consumption minimization strategy” *Control Engineering Practice*, v. 19, n. 10, pp.1182-1194, 2011.
- [17] MIRANDA, P. E. V., CERVEIRA, L. A. C. M., BUSTAMANTE, J. C., “Pilhas a Combustível”, In: Tolmasquim, M.T., *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*, 1 ed., pp. 425-483, Rio de Janeiro, Brasil, Editora Interciência, 2003.

- [18] GARRIGÓS, A., BLANES, J.M., LIZÁN, J.L., “Non-isolated multiphase boost converter for a fuel cell with battery backup power system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 10, pp. 6259-6268, 2011.
- [19] YANG, Y., LIU, Z, WANG, F., “An application of indirect model reference adaptive control to a low-power proton exchange membrane fuel cell”, *Journal of Power Sources*, v.179, n. 2, pp. 618–630, 2008.
- [20] QI, Y., HUANG, B., CHUANG, K. T., “Dynamic modeling of solid oxide fuel cell: The effect of diffusion and inherent impedance”, *Journal of Power Sources*, v. 150, n. 1, pp. 32-47, 2005.
- [21] HUO, H., ZHONG, Z., ZHU, X., et al., “Nonlinear dynamic modeling for a SOFC stack by using a Hammerstein model”, *Journal of Power Sources*, v. 175, n. 1, pp. 441–446, 2008.
- [22] LISBONA, P., CORRADETTI, A., BOVE, R., et al., “Analysis of a solid oxide fuel cell system for combined heat and power applications under non-nominal conditions”, *Electrochimica Acta*, v. 53, n. 4, pp. 1920–1930, 2007.
- [23] CAMPANARI, S., MACCHI, E., MANZOLINI, G., “Innovative membrane reformer for hydrogen production applied to PEM micro-cogeneration: Simulation model and thermodynamic analysis”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 4, pp. 1361–1373, 2008.
- [24] ADZAKPA, K., RAMOUSSE, J., DUBÉ, Y., et al., “Transient air cooling thermal modeling of a PEM fuel cell”, *Journal of Power Sources*, v. 179, n. 1, pp. 164–176, 2008.
- [25] SORRENTINO, M., PIANESE, C., “Model-based development of low-level control strategies for transient operation of solid oxide fuel cell systems”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 21, pp. 9036-9045, 2011.

- [26] HUANG, B., QI, Y., MURSHED, M., “Solid oxide fuel cell: Perspective of dynamic modeling and control”, *Journal of Process Control*, v. 21, n. 10, pp. 1426-1437, 2011.
- [27] FERRARI, M. L., “Solid oxide fuel cell hybrid system: Control strategy for stand-alone configurations”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 5, pp. 2682-2690, 2011.
- [28] AHLUWALIA, R., WANG, X., “Fuel cell systems for transportation: Status and trends”, *Journal of Power Sources*, v. 177, n. 1, pp. 167–176, 2008.
- [29] HONG, W., YEN, T., CHUNG, T., et al., “Efficiency analyses of ethanol-fueled solid oxide fuel cell power system”, *Applied Energy*, v. 88, n. 11, pp. 3990-3998, 2011.
- [30] FEROLDI, D., SERRA, M., RIERA, J., “Performance improvement of a PEMFC system controlling the cathode outlet air flow”, *Journal of Power Sources*, v. 169, n. 1, pp. 205–212, 2007.
- [31] LI, Y., SHEN, J., LU, J., “Constrained model predictive control of a solid oxide fuel cell based on genetic optimization”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 14, pp. 5873-5880, 2011.
- [32] ANG, S. C., FRAGA, E. S., BRANDON, N. P., et al., “Fuel cell systems optimisation – Methods and strategies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 22, pp. 14678-14703, 2011.
- [33] VEGA-LEAL, A., PALOMO, F., BARRAGÁN, F., et al., “Design of control systems for portable PEM fuel cells”, *Journal of Power Sources*, v. 169, n. 1, pp. 194–197, 2007.
- [34] STILLER, C., THORUD, B., BOLLAND, O., et al., “Control strategy for a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system”, *Journal of Power Sources*, v. 158, n. 1, pp. 303-315, 2006.

[35] QI, Y., HUANG, B., LUO, J., “Dynamic modeling of a finite volume of solid oxide fuel cell: The effect of transport dynamics”, *Chemical Engineering Science*, v. 61, n. 18, pp. 6057-6076, 2006.

[36] ZHANG, X., LI, J., LI, G., et al., “Dynamic modeling of a hybrid system of the solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine”, *Journal of Power Sources*, v. 163, n. 1, pp. 523-531, 2006.

[37] AHN, J., CHOE, S., “Coolant controls of a PEM fuel cell system”, *Journal of Power Sources*, v. 179, n. 1, pp. 252–264, 2008.

[38] MEILER, M., SCHMID, O., SCHUDY, M., et al., “Dynamic fuel cell stack model for real-time simulation based on system identification”, *Journal of Power Sources*, v. 176, n. 2, pp. 523–528, 2008.

[39] MCKAY, D., SIEGEL, J., OTT, W., et al., “Parameterization and prediction of temporal fuel cell voltage behavior during flooding and drying conditions”, *Journal of Power Sources*, v. 178, n. 1, pp. 207–222, 2008.

[40] BLUNIER, B., MIRAOUI, A., “Modelling of fuel cells using multi-domain VHDL-AMS language”, *Journal of Power Sources*, v. 177, n. 2, pp. 434–450. 2008.

[41] CHU, K., RYU, J., SUNWOO, M., “A lumped parameter model of the polymer electrolyte fuel cell”, *Journal of Power Sources*, v. 171, n. 2, pp. 412–423, 2007.

[42] ZHANG, X., CHAN, S., HO, H., et al., “Nonlinear model predictive control based on the moving horizon state estimation for the solid oxide fuel cell”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 33, n. 9, pp. 2355 – 2366, 2008.

[43] BOVE, R., UBERTINI, S., “Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results”, *Journal of Power Sources*, v. 159, n. 1, pp. 543-559, 2006.

- [44] KANG, Y., LI, J., CAO, G., et al., “Dynamic temperature modeling of an SOFC using least squares support vector machines”, *Journal of Power Sources*, v. 179, n. 2, pp. 683–692, 2008.
- [45] MUELLER, F., JABBARI, F., GAYNOR, R., et al., “Novel solid oxide fuel cell system controller for rapid load following”, *Journal of Power Sources*, v. 172, n. 1, pp. 308–323, 2007.
- [46] GAYNOR, R., MUELLER, F., JABBARI, F., et al., “On control concepts to prevent fuel starvation in solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, v. 180, n. 1, pp. 330–342, 2008.
- [47] ZHANG, X., CHAN, S.H., LI, G., et al., “A review of integration strategies for solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 3, pp. 685-702, 2010.
- [48] UZUNOGLU, M., ONAR, O., “Static VAr compensator based reactive power management for SOFC power plants”, *International Journal of Hydrogen*, v. 33, n. 9, pp. 2367–2378, 2008.
- [49] SORRENTINO, M., PIANESE, C., GUEZENNEC, Y., “A hierarchical modeling approach to the simulation and control of planar solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, v. 180, n. 1, pp. 380–392, 2008.
- [50] FARDADI, M., MUELLER, F., JABBARI, F., “Feedback control of solid oxide fuel cell spatial temperature variation”, *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 13, pp. 4222-4233, 2010.
- [51] SALOGNI, A., COLONNA, P., “Modeling of solid oxide fuel cells for dynamic simulations of integrated systems”, *Applied Thermal Engineering*, v. 30, n. 5, pp. 464-477, 2010.

[52] ZHANG, X. W., CHAN, S. H., HO, H. K., et al., “Estimation and control of solid oxide fuel cell system”, *Computers & Chemical Engineering*, v. 34, n. 1, pp. 96-111, 2010.

[53] CARL, M., DJILALI, N., BEAUSOLEIL-MORRISON, I., “Improved modelling of the fuel cell power module within a system-level model for solid-oxide fuel cell cogeneration systems”, *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 8, pp. 2283-2290, 2010.

[54] ZHANG, X., LI, J., LI, G., et al., “Cycle analysis of an integrated solid oxide fuel cell and recuperative gas turbine with an air reheating system”, *Journal of Power Sources*, v. 164, n. 2, pp. 752–760, 2007.

[55] WAKUI, T., YOKOYAMA, R., SHIMIZU, K., “Suitable operational strategy for power interchange operation using multiple residential SOFC (solid oxide fuel cell) cogeneration systems”, *Energy*, v. 35, n. 2, pp. 740-750, 2010.

[56] LEUCHT, F., BESSLER, W. G., KALLO, J., et al., “Fuel cell system modeling for solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plants, Part I: Modeling and simulation framework”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 3, pp. 1205-1215, 2011.

[57] CHEDDIE, D. F., “Thermo-economic optimization of an indirectly coupled solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plant”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 2, pp.1702-1709, 2011.

[58] WANG, K., HISSEL, D., PÉRA, M.C., et al., “A Review on solid oxide fuel cell models”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 12, pp. 7212-7228, 2011.

[59] QI, A., PEPPLEY, B., KARAN, K., “Integrated fuel processors for fuel cell application: A review”, *Fuel Processing Technology*, v. 88, n. 1, pp. 3–22, 2007.

[60] MURSHED, A. M., HUANG, B., NANDAKUMAR, K., “Estimation and control of solid oxide fuel cell system”, *Computers & Chemical Engineering*, v. 34, n. 1, pp. 96-111, 2010.

- [61] SEIDLER, S., HENKE, M., KALLO, J., et al., “Pressurized solid oxide fuel cells: Experimental studies and modeling”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 17, pp. 7195-7202, 2011.
- [62] BUNIN, G. A., WUILLEMIN, Z., FRANÇOIS, G., et al., “Experimental real-time optimization of a solid oxide fuel cell stack via constraint adaptation”, *Energy*, v. 39, n. 1, pp. 54-62, 2012.
- [63] KAZEMPOOR, P., OMMI, F., DORER, V., “Response of a planar solid oxide fuel cell to step load and inlet flow temperature changes”, *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 21, pp. 8948-8954, 2011.
- [64] SCHULZE, M., GULZOW, E., SCHONBAUER, S., et al., “Segmented cells as tool for development of fuel cells and error prevention/prediagnostic in fuel cell stacks”, *Journal of Power Sources*, v. 173, n. 1, pp. 19–27, 2007.
- [65] GOUNDEN, N., PETER, S., NALLANDULA, N., et al., “Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid-connected photovoltaic systems”, *Renewable Energy*, v. 34, n. 3, pp. 909–915, 2009.
- [66] PANIGRAHI, B., DASH, P., REDDY, J., “Hybrid signal processing and machine intelligence techniques for detection, quantification and classification of power quality disturbances”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 22, n. 3, pp. 442–454, 2009.
- [67] HUGGINS, R., *Energy Storage*, 1 ed. New York, Springer Science+Business Media, 2010.
- [68] RENDERS, B., GUSSEME, K., RYCKAERT, W., et al., “Converter-connected distributed generation units with integrated harmonic voltage damping and harmonic

current compensation function”, *Electric Power Systems Research*, v. 79, n. 1, pp. 65–70, 2009.

[69] BINA, M., PASHAJAVID, E., “An efficient procedure to design passive LCL-filters for active power filters”, *Electric Power Systems Research*, v. 79, n. 4, pp. 606–614, 2009.

[70] DAHIDAH, M., AGELIDIS, V., RAO, M., “Hybrid genetic algorithm approach for selective harmonic control”, *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 2, pp. 131–142, 2008.

[71] GUTIERREZ, O., FUERTE-ESQUIVEL, C., RUBIO, J., et al., “Harmonic analysis of AC/DC systems based on phase-domain multi-port network approach”, *Electric Power Systems Research*, v. 78, n. 10, pp. 1789–1797, 2008.

[72] MUSALLAM, M., ACARNLEY, P., JONSON, C., et al., “Power electronic device temperature estimation and control in pulsed power and converter applications”, *Control Engineering Practice*, v. 16, n. 12, pp. 1438–1442, 2008.

[73] YANG, Y., DENNETIÈRE, S., “Modeling of the behavior of power electronic equipment to grid ripple control signal”, *Electric Power Systems Research*, v. 79, n. 3, pp. 443–448, 2009.

[74] ZHIJUN, E., FANG, D., CHAN, K., et al., “Hybrid simulation of power systems with SVC dynamic phasor model”, *Electrical Power and Energy Systems*, v. 31, n. 5, pp. 175–180, 2009.

[75] IANNELLI, L., JOHANSSON, K., JONSSON, U., et al., “Subtleties in the averaging of a class of hybrid systems with applications to power converters”, *Control Engineering Practice*, v. 16, n. 8, pp. 961–975, 2008.

[76] AOUZELLAG, D., GHEDAMSI, K., BERKOUK, E., “Network power flux control of a wind generator”, *Renewable Energy*, v. 34, n. 3, pp. 615–622, 2009.

[77] GAILLARD, A., POURE, P., SAADATE, S., et al., “Variable speed DFIG wind energy system for power generation and harmonic current mitigation”, *Renewable Energy*, v. 34, n. 6, pp. 1545–1553, 2009.

[78] URSUA, A., MARROYO, L., GUBIA, E., et al., “Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 34, n. 8, pp. 3221-3233, 2009.

[79] SARRUF, B. J., 2010, *Reconstrução 3D de catodo e modelagem matemática do desempenho eletroquímico de uma pilha a combustível de óxido sólido*. Projeto final, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

[80] FERGUS, J. W., “Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries”, *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 4, pp. 939-954, 2010.

[81] MUKHERJEE, R., KRISHNAN, R., LU, T., et al., “Nanostructured electrodes for high-power lithium ion batteries”, *Nano Energy*, v. 1, n. 4, pp. 518-533, 2012.

[82] SONG, M., PARK, S., ALAMGIR, F. M., CHO, J., et al., “Nanostructured electrodes for lithium-ion and lithium-air batteries: the latest developments, challenges, and perspectives”, *Materials Science and Engineering*, v. 72, n. 11, pp. 203-252, 2011.

[83] MILLS, A., AL-HALLAJ, S., “Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs”, *Journal of Power Sources*, v. 141, n. 2, pp. 307-315, 2005.

[84] BELT, J. R., HO, C. D., MOTLOCH, C. G., et al., “A capacity and power fade study of Li-ion cells during life cycle testing”, *Journal of Power Sources*, v. 123, n. 2, pp. 241-246, 2003.

[85] MOHAN, N., UNDELAND, T., ROBBINS, W., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 2 ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 1994.

- [86] AHMED, A., *Eletrônica de Potência*, 1 ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2000.
- [87] MESQUITA FILHO, A. C., PEDROZA, A. C., ARAUJO, S. G., “A Scenario Based Approach to Protocol Design Using Evolutionary Techniques”, *Lecture Notes in Computer Science*, v. 3005, n. 1, pp. 178-187, 2004.
- [88] VALENTE, J., GONÇALVES, J., “A genetic algorithm approach for the single machine scheduling problem with linear earliness and quadratic tardiness penalties”, *Computers & Operations Research*, v. 36, n. 10, pp. 2707 – 2715, 2009.
- [89] SAHMAN, M., CUNKAS, M., et al., “Cost optimization of feed mixes by genetic algorithms”, *Advances in Engineering Software*, v. 40, n. 10, pp. 965-974, 2009.
- [90] SOURIRAJAN, K., OZSEN, L., UZSOY, R., “A genetic algorithm for a single product network design model with lead time and safety stock considerations”, *European Journal of Operational Research*, v. 197, n. 2, pp. 599-608, 2009.
- [91] HWANG, S., WU, J., HE, R., “Identification of effective elastic constants of composite plates based on a hybrid genetic algorithm”, *Composite Structures*, v. 90, n. 2, pp. 217-224, 2009.
- [92] ALTUNKAYNAK, A., “Sediment load prediction by genetic algorithms”, *Advances in Engineering Software*, v. 40, n. 9, pp. 928-934, 2009.
- [93] MATTA, M., “A genetic algorithm for the proportionate multiprocessor open shop”, *Computers & Operations Research*, v. 36, n. 9, pp. 2601-2618, 2009.
- [94] POOJARI, C., BEASLEY, J., “Improving benders decomposition using a genetic algorithm”, *European Journal of Operational Research*, v. 199, n. 1, pp. 89-97, 2009.

Anexos

A- Programação de otimização com Algoritmo Genético

```
% Programação genetica para balanço de planta em pilhas a combustível
%
% 02/11/2008
%
% Definição dos valores iniciais para primeira população
%
%% Variáveis e valores de referencia
%
conc3o=0.6;
conc3h=0.82;
flux3vent=0.52;
press3cel=2;
temp3cel=220;
area3ativ=40;
num3cel=60;
flux3h=4;
%
%% Constantes
%
F=96485; R=8.314; Pa=1; Ps=1.2; Ro=0.126; ne=2; Jo=0.8; JL=1.2;
Nu=2; Ga=1.4; Ta=25; Efc=0.98; Cp=1004; Pot=1500;
%
%% Parâmetros genéticos
%
popul=200;
variav=8;
selec=120;
elit=4;
```

```

gerac=50;
mut=2;
%
%%% População inicial
%
e=[conc3o conc3h flux3vent press3cel temp3cel area3ativ num3cel flux3h];
f=10*rand(popul,variav);
m=0; k=0; d=0; qq=0; ff=0; ee=0; i=0; ii=0;
while i<popul
    i=i+1;
    while ii<variav
        ii=ii+1;
        g(i,ii)=f(i,ii)*e(ii);
    end
    ii=0;
end
%
%
% Início do ciclo de operações genéticas
%
while ee<gerac
    %
    %
    % Aplicação da função objetivo e classificação por aptidão
    %
    i=0; h=0; n=0; p=0; s=0; t=0; Xo2=0; Xh2=0; Ncp=0; P=0;
    T=0; A=0; No=0; Nfc=0; Eo=0; E=0; Ph2o=0; Ph2=0; Po2=0;
    u=0; I=0; Ifc=0; J=0; Va=0; Vo=0; Vc=0; V=0; Ws=0;
    while i<popul
        i=i+1;
        Xo2=g(i,1);

```

```

        Xh2=g(i,2);
        Ncp=g(i,3);
        P=g(i,4);
        T=g(i,5);
        A=g(i,6);
        No=g(i,7);
        Nfc=g(i,8);

    Ph2o=P;
    Eo=1.2723-(2.7645*(10^(-4))*T);
    Ph2=Xh2*P;
    Po2=Xo2*P;
    E=Eo+(((R*T)/(ne*F))*log(Ph2o/(Ph2*sqrt(Po2))));
    u=(ne*A)/(2*F*Nfc);
    I=(2*F*Nfc*(1-Xh2))/A;
    Ifc=(2*Nfc*F*u)/No;
    J=Ifc/A;
    Va=((2*R*T)/(ne*F))*asinh(J/(2*Jo));
    Vo=Ifc*Ro;
    Vc=((R*T)/F)*log(1-(J/JL));
    V=(E-Va-Vo-Vc)*No;

    Ws=((Nu*Cp*Ta*Ncp)/EfcP)*(((Ps/Pa)^((Ga-1)/Ga))-1);
    h(i)=real(1/(1+abs(((Pot-((V*I)-(Ws*1.2)))/Pot))));
end
[n,p]=sort(h);
i=0; q=0;
while i<popul
    i=i+1;
    q=q+h(i);
end
s=(h/q)*1000;
t=round(s);

```

```

%
%
% Selecao de individuos para introducao de elitismo
%
i=0; ii=0; ff=0; gg=popul; a=elit;
while i<a
    i=i+1;
    while ii<variav
        ii=ii+1;
        ff(i,ii)=g(p(gg-i+1),ii);
    end
    ii=0;
end
%
%
% Introducao de mutacoes geneticas
%
u=0; v=0; x=0; pp=0;
while x<mut
    u=round(rand(1)*popul);
    pp=rand(1);
    v=round(rand(1)*variav);
    if v<1
        v=1;
    end
    if u<1
        u=1;
    end
    if pp<1
        pp=1;
    end
end

```

```

    g(u,v)=pp*g(u,v);
    x=x+1;
end
%
%
% Sorteio de individuos para reprodução com base na aptidao
%
x=0; ii=0; u=0; v=0; aa=0; cc=0; zz=0; uu=0; i=0;
while i<popul
    i=i+1;
    uu=uu+t(i);
end
while x<selec
    u=rand(1)*uu;
    v=round(u);
    while v>zz
        aa=aa+1;
        zz=zz+t(aa);
        if v<=zz
            x=x+1;
            ii=0;
            while ii<variav
                ii=ii+1;
                bb(x,ii)=g(p(aa),ii);
            end
            cc(x)=p(aa);
        end
    end
end
aa=0; zz=0;
end
%
```

```

%
% Rotina de reprodução dos indivíduos selecionados
%
i=0; j=0; z=0; rr=0; m=0;
while j<selec
    j=j+1;
i=i+1;
m=round(rand(1)*(variav-1));
if m==0
    m=1;
end
    while z<variav
z=z+1;
    if z<=m
rr(j,z)=bb(i,z);
rr(j+1,z)=bb(i+1,z);
    end
    if z>m
rr(j,z)=bb(i+1,z);
rr(j+1,z)=bb(i,z);
    end
    end
    i=i+1;
j=j+1;
z=0;
end
%
%
% Introdução dos novos indivíduos na população de origem
%
i=0;

```

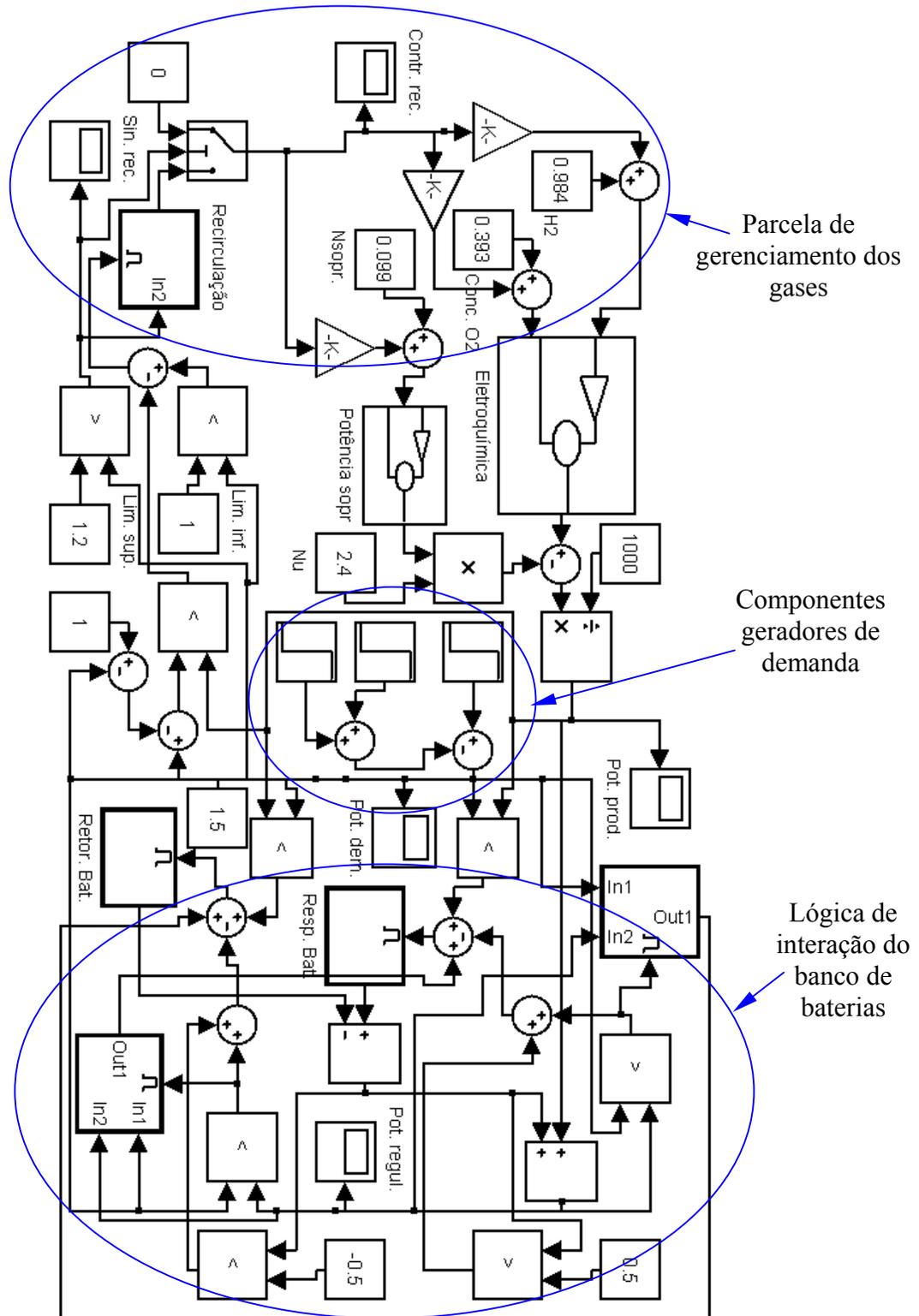
```

while i<selec
    ii=0;
    i=i+1;
    while ii<variav
        ii=ii+1;
        g(cc(i),ii)=rr(i,ii);
    end
end
i=0; c=0;
while a>0
    i=i+1;
    ii=0;
    c=round(rand(1)*popul);
    if c==0
        c=1;
    end
    while ii<variav
        ii=ii+1;
        g(c,ii)=ff(i,ii);
    end
    a=a-1;
end
%
%
% Coleta dos resultados para representação gráfica
%
ee=ee+1;
qq(ee)=(ee-1); % Índice de gerações no gráfico
k(ee)=(q/popul)*100; % Média da aptidão populacional
d(ee)=(n(popul))*100; % Indivíduo mais apto a cada geração
end

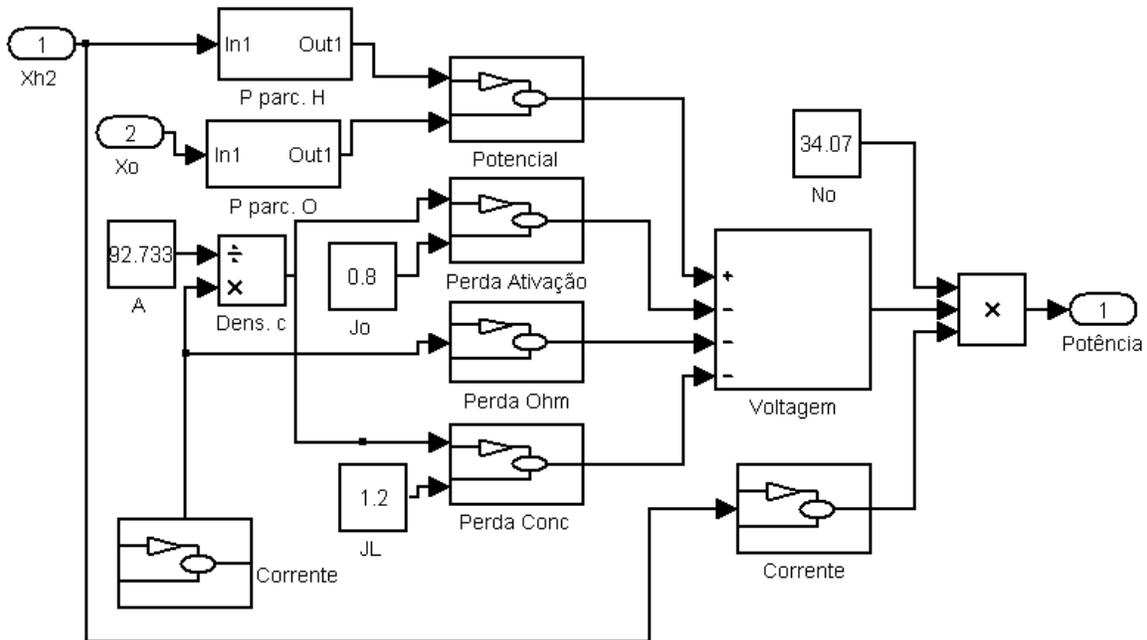
```

```
%  
%  
% Fim do programa e apresentação grafica do processo de evolução  
%  
disp('Solução evoluida');  
disp((ff)/10);  
plot(qq,k,qq,d);  
title('EVOLUÇÃO DE VARIÁVEIS DA PILHA');  
xlabel('Gerações de evolução');  
ylabel('Percentual de aptidão como solução');  
grid;
```

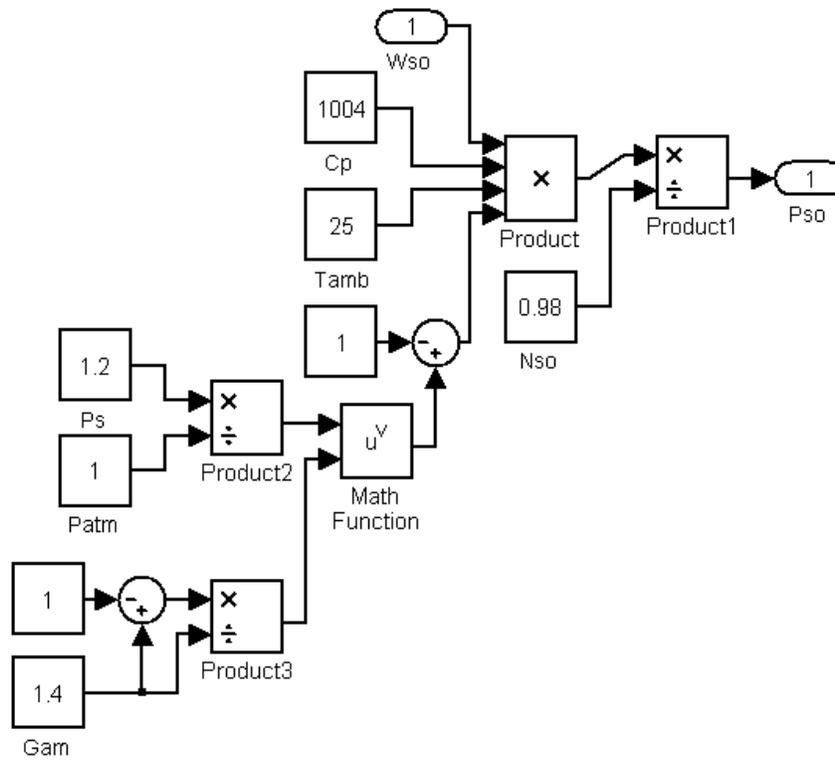
B- Diagrama de programação da estratégia de controle no Simulink



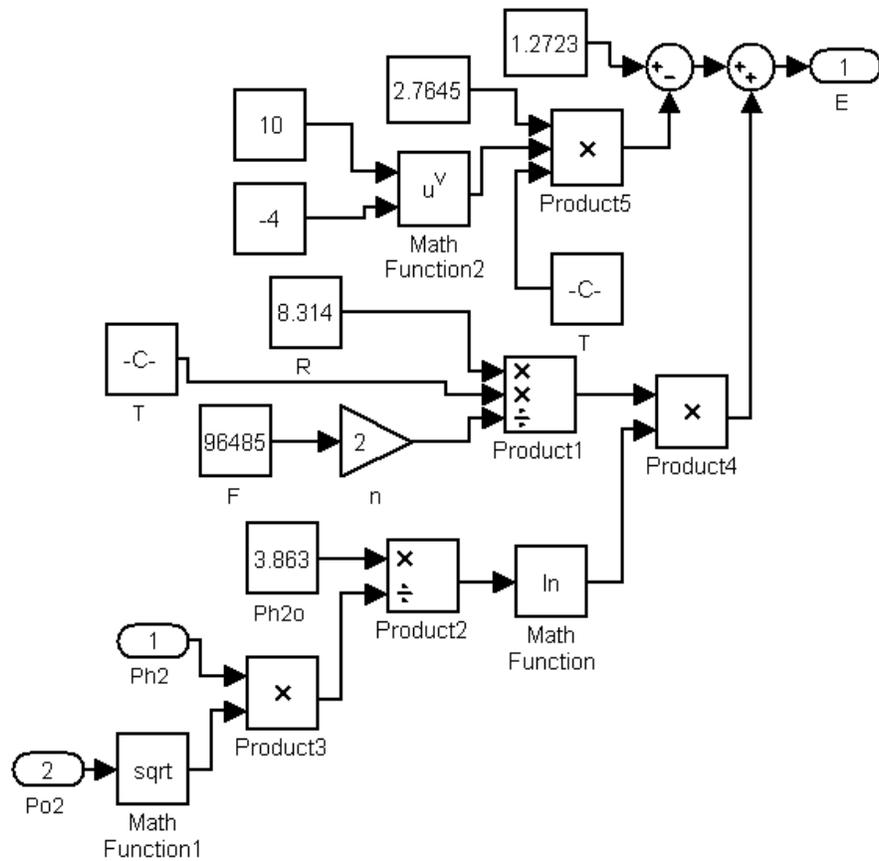
Estrutura principal de simulação



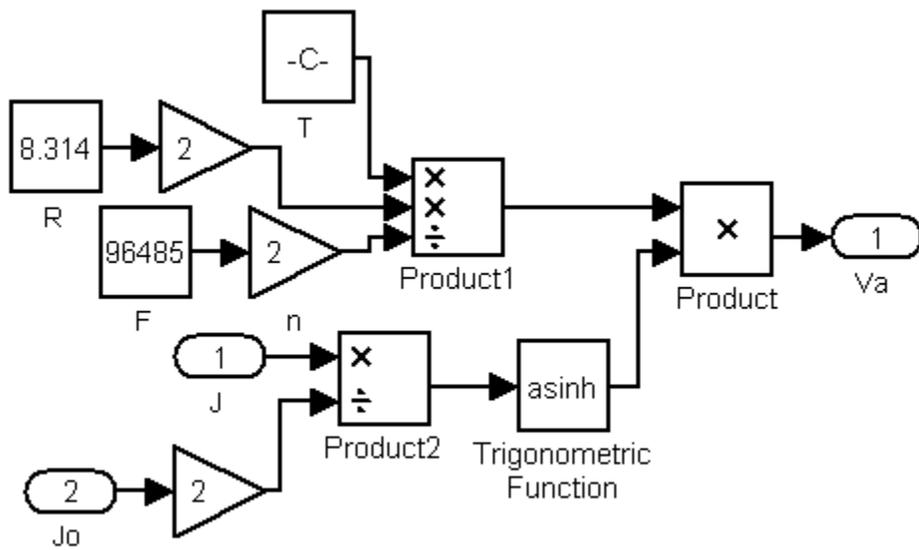
Subsistema de Eletroquímica



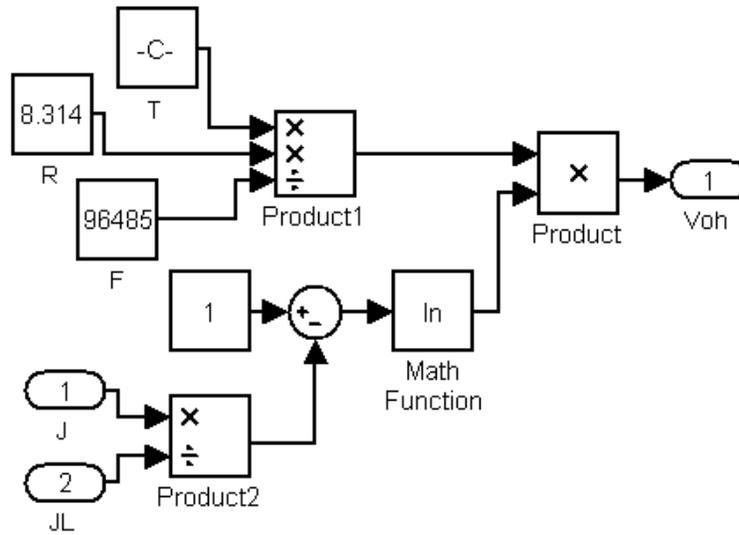
Subsistema Soprador



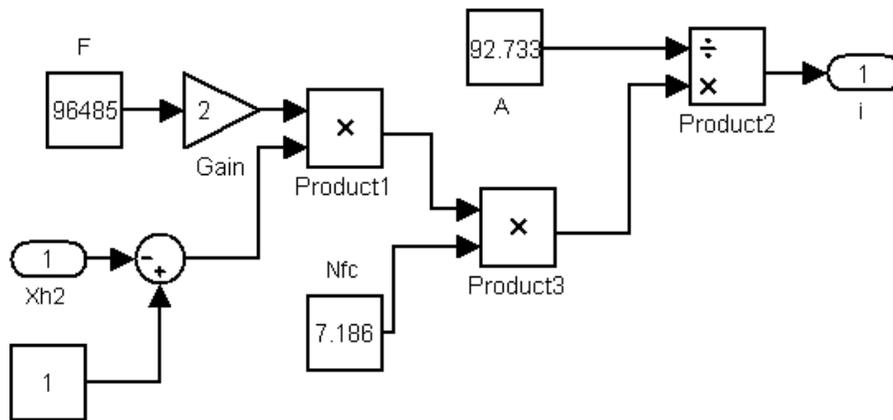
Subsistema de Potencial



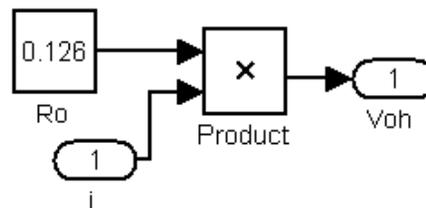
Subsistema de Ativação



Subsistema de Concentração



Subsistema de Corrente



Subsistema Ôhmico

C- Programas dos microcontroladores

Programa de gerenciamento da potência

```
. * * * * *
;
; *           DESCRIÇÃO GERAL           *
; *
; *
; * * * * *
; PROGRAMA PARA CONTROLE DA POTÊNCIA FORNECIDA
; DATA : 27/03/2010
; * * * * *
; *           CONFIGURAÇÕES PARA GRAVAÇÃO           *
; * * * * *

__CONFIG_CP_OFF & _CPD_OFF & _DEBUG_OFF & _LVP_OFF & _WRT_OFF & _BODEN_OFF &
_PWRTE_ON & _WDT_OFF & _XT_OSC

. * * * * *
;
; *           ARQUIVO DE DEFINIÇÕES INTERNAS DO PIC           *
; * * * * *

#include <P16F877A.INC>           ; MICROCONTROLADOR UTILIZADO

. * * * * *
;
; *           DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS           *
; * * * * *
; ESTE BLOCO DE VARIÁVEIS ESTÁ LOCALIZADO LOGO NO INÍCIO DO BANCO 0

CBLOCK      0X20           ; POSIÇÃO INICIAL DA RAM

TENS

ENDC

. * * * * *
;
; *           DEFINIÇÃO DOS BANCOS DE RAM           *
; * * * * *
```

```

#DEFINE      BANK1 BSF      STATUS,RP0      ; SELECIONA BANK1 DA MEMORIA RAM
#DEFINE      BANK0 BCF      STATUS,RP0      ; SELECIONA BANK0 DA MEMORIA RAM

;
; *****
; *                ENTRADAS                *
; *****
;

#DEFINE      ANALO          PORTA,1          ; ENTRADA DE SINAL ANALOGICO

;
; *****
; *                SAÍDAS                  *
; *****
;

#DEFINE      FON            PORTA,5          ; ACIONAMENTO DA FONTE

#DEFINE      CARR           PORTE,0         ; CARREGAMENTO DA BATERIA

#DEFINE      BATE           PORTA,0         ; ACIONAMENTO DA BATERIA

#DEFINE      LED            PORTC,0         ; LED INDICADOR DE FUNCIONAMENTO

;
; *****
; *                VETOR DE RESET DO MICROCONTROLADOR                *
; *****
;

      ORG      0X0000          ; ENDEREÇO DO VETOR DE RESET
      GOTO     CONFIG         ; PULA PARA CONFIG DEVIDO A REGIÃO

;
; *****
; *                CONFIGURAÇÕES INICIAIS DE HARDWARE E SOFTWARE        *
; *****
;

CONFIG

      CLRF    PORTA           ; GARANTE TODAS AS SAÍDAS EM ZERO
      CLRF    PORTB
      CLRF    PORTC
      CLRF    PORTD

```

CLRF PORTE

BANK1 ; SELECIONA BANCO 1 DA RAM

MOVLW B'11011110'
MOVWF TRISA ; CONFIGURA I/O DO PORTA

MOVLW B'11111111'
MOVWF TRISB ; CONFIGURA I/O DO PORTB

MOVLW B'11111110'
MOVWF TRISC ; CONFIGURA I/O DO PORTC

MOVLW B'11111111'
MOVWF TRISD ; CONFIGURA I/O DO PORTD

MOVLW B'11111110'
MOVWF TRISE ; CONFIGURA I/O DO PORTE

MOVLW B'11011011'
MOVWF OPTION_REG ; CONFIGURA OPTIONS

MOVLW B'00000000'
MOVWF INTCON ; CONFIGURA INTERRUPTÕES

MOVLW B'00000100'
MOVWF ADCON1 ; CONFIGURA CONVERSOR A/D

BANK0 ; SELECIONA BANCO 0 DA RAM

MOVLW B'01001001'
MOVWF ADCON0 ; CONFIGURA CONVERSOR A/D

```
. * * * * *
;
; *          INICIALIZAÇÃO DA RAM          *
; * * * * *
;
```

```

        MOVLW      0X20
        MOVWF     FSR                ; APONTA O ENDEREÇAMENTO INDIRETO PARA
                                        ; A PRIMEIRA POSIÇÃO DA RAM

LIMPA_RAM
        CLRWF    INDF                ; LIMPA A POSIÇÃO
        INCF     FSR,F              ; INCREMENTA O PONTEIRO P/ A PRÓX. POS.
        MOVF     FSR,W
        XORLW    0X80                ; COMPARA O PONTEIRO COM A ÚLT. POS. +1
        BTFSS   STATUS,Z            ; JÁ LIMPOU TODAS AS POSIÇÕES?
        GOTO    LIMPA_RAM          ; NÃO - LIMPA A PRÓXIMA POSIÇÃO
                                        ; SIM

; *****
; *                ROTINA PRINCIPAL                *
; *****

        BSF     FON                ; DIRECIONA FONTE PARA CARGA
        BSF     LED                ; ACIONA INDICADOR DA FONTE

LOOP
        BSF     ADCON0,GO          ; INICIA CONVERSÃO A/D
        BTFSC   ADCON0,GO          ; FIM DA CONVERSÃO?
        GOTO    $-1                ; NÃO, VOLTA 1 INSTRUÇÃO
                                        ; SIM
        MOVF    ADRESH,W           ; SALVA VALOR DA CONVERSÃO EM W
        MOVWF   TENS               ; CARREGA VALOR EM TENS

        MOVLW   .1                 ; INICIA COMPARAÇÃO
        SUBWFTENS,W                ; SUBTRAI 1 DE TENS
        BTFSS   STATUS,C           ; TESTA CARRY,RESULTADO NEGATIVO?
        GOTO    NULO               ; SIM, CARGA IGUAL A ZERO
                                        ; NÃO, CONTINUA COMPARAÇÃO
        MOVLW   .45                ; INICIA NOVA COMPARAÇÃO
        SUBWFTENS,W                ; SUBTRAI 45 DE TENS
        BTFSS   STATUS,C           ; TESTA CARRY,RESULTADO NEGATIVO?
        GOTO    NORMA              ; SIM, CARGA NORMAL
                                        ; NÃO, CARGA ELEVADA

```

```
BCF CARR ; DELIGA CARREGAMENTO DE BATERIA
BSF BATE ; DIRECIONA BATERIA PARA CARGA
GOTO LOOP ; RETORNA PARA CONVERÇÃO
```

NULO

```
BSF CARR ; LIGA CARREGAMENTO DE BATERIA
BCF BATE ; DESLIGA BATERIA DA CARGA
GOTO LOOP ; RETORNA PARA CONVERÇÃO
```

NORMA

```
BCF CARR ; DELIGA CARREGAMENTO DE BATERIA
BCF BATE ; DESLIGA BATERIA DA CARGA
GOTO LOOP ; RETORNA PARA CONVERÇÃO
```

```
. * * * * *
;
; * FIM DO PROGRAMA *
. * * * * *
```

```
END ; FIM DO PROGRAMA
```

Programa para conversão de potência

```
.
;
;
; CONTROLADO PARA CONVERSOR DE POTÊNCIA
; *****
; Data: 05/04/10
; *****
; Programa para PiC 16F628A
;
; *****
; ARQUIVOS DE DEFINIÇÕES
;
; #INCLUDE <P16F628.INC> ;ARQUIVO PADRÃO
```

```

;*****
;
;           PAGINAÇÃO DE MEMÓRIA
;
;
#DEFINE          BANK0 BCF STATUS,RP0          ;SETA BANK 0 DE MEMÓRIA
#DEFINE          BANK1 BSF STATUS,RP0;SETA BANK 1 DE MEMÓRIA

;*****
;
;           VARIÁVEIS
;
;
;           CBLOCK          0x20          ;ENDEREÇO INICIAL DA MEMÓRIA DE USUÁRIO
;           TEMP1
;           TEMP2
;           ENDC          ;FIM DO BLOCO DE MEMÓRIA

;*****
;
;           SAÍDAS
;
;
#DEFINE          TR3          PORTA,2          ;ACIONA TRANSISTOR T3
#DEFINE          TR4          PORTA,3          ;ACIONA TRANSISTOR T4
#DEFINE          TR1          PORTB,1          ;ACIONA TRANSISTOR T1
#DEFINE          TR2          PORTB,0          ;ACIONA TRANSISTOR T2
#DEFINE          ELEV          PORTB,3          ;ACIONA ELEVADOR DE TENSÃO
#DEFINE          LED1          PORTB,7          ;INDICA  FUNCIONAMENTO  DO
SISTEMA
#DEFINE          LED2          PORTB,6          ;INDICAÇÃO OPCIONAL

;*****
;
;           VETOR RESET
;
;
;           ORG          0x00          ;ENDEREÇO INICIAL DE PROCESSAMENTO
;
;           GOTO  INICIO

;*****
;
;           INÍCIO DAS INTERRUPÇÕES
;
;
;           ORG          0x04          ;ENDEREÇO INICIAL DA INTERRUPÇÃO
;
;           RETFIE          ;RETORNA DA INTERRUPÇÃO

;*****
;
;           INÍCIO DO PROGRAMA

```



```

BSF    ELEV                ;ACIONA ELEVADOR
CALL   DELAY

MOVW   .30
MOVWF  TEMP2              ;DEFINE DELAY PARA ELEVADOR
BSF    ELEV                ;ACIONA ELEVADOR
CALL   DELAY

MOVW   .25
MOVWF  TEMP2              ;DEFINE DELAY PARA ELEVADOR
BSF    TR1                 ;ACIONA TRANSISTOR
BSF    TR4                 ;ACIONA TRANSISTOR
NOP                    ;INTRODUZ INTERVALO
BSF    TR2                 ;ACIONA TRANSISTOR
BSF    TR3                 ;ACIONA TRANSISTOR
BSF    LED1                ;INDICA FUNCIONAMENTO
CALL   DELAY

MOVW   .15
MOVWF  TEMP2              ;DEFINE DELAY PARA ELEVADOR
BSF    ELEV                ;ACIONA ELEVADOR
CALL   DELAY

MOVW   .30
MOVWF  TEMP2              ;DEFINE DELAY PARA ELEVADOR
BSF    ELEV                ;ACIONA ELEVADOR
CALL   DELAY
GOTO   MAIN

DELAY
MOVW   .250
MOVWF  TEMP1              ;INICIA VARIAVEL DE ms
DL1
NOP                    ;GASTA UM CICLO
DECFSZ TEMP1,F          ;DECREMENTA VARIAVEL DE ms
GOTO   DL1              ;NÃO, CONTINUA DL1
DECFSZ TEMP2,F          ;DECREMENTA VARIAVEL DE DELAY
GOTO   DELAY           ;NÃO, CONTINUA DELAY
RETURN

;*****
;
END                      ; FIM DO PROGRAMA

```