

NILSON NORIS FRANCESCHETTI

**SISTEMA DE ACIONAMENTO E
CONTROLE PARA VEÍCULO ELÉTRICO
MOVIDO À ENERGIA SOLAR**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia**

**São Paulo
1998**

NILSON NORIS FRANCESCHETTI

**SISTEMA DE ACIONAMENTO E
CONTROLE PARA VEÍCULO ELÉTRICO
MOVIDO À ENERGIA SOLAR**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração:
*Engenharia Mecânica***

**Orientador:
*Prof. Dr. Marcelo Godoy Simões***

**São Paulo
1998**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010156

**Aos maiores amores da minha vida:
Elisele e Diogo**

AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa Elisele, pelo carinho, paciência e apoio nas horas difíceis.

Ao meu amigo Marcelo Godoy, pelo constante incentivo e encorajamento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Godoy Simões, pela confiança, apoio, segura orientação, entusiasmo, e profissionalismo apresentado durante todo o trabalho.

Ao Prof. Dr. Júlio César Adamowski, pelo incentivo, apoio, sugestões, e oportunidade em participar da WSC.

Ao Prof. Dr. Júlio Carlos Teixeira, pelo incentivo e sugestões.

Ao Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi, pelo apoio inicial.

Ao meu amigo Júlio Arakaki, pelas constantes dicas de software.

Aos amigos do Grupo de Acionamento Inteligente (GACI), Petrônio, Sílvio, Pitta, Jhonny, Alberto, Javier e Otávio, pelo excelente ambiente de trabalho proporcionado, sugestões e dicas durante toda a elaboração do trabalho.

Ao engenheiro Alan Tavares de Souza pela intensa e incansável ajuda durante o projeto do Poli-Solar.

À todos os amigos da Mecatrônica que me incentivaram.

À todos os amigos do Departamento de Engenharia Mecânica, que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

ERRATA

SUBSTITUIÇÕES:

RESUMO: onde se lê: “*O sistema de propulsão é composto por duas rodas dianteiras direcionáveis e uma roda traseira que traciona o veículo através de controle de acionamento de um motor Brushless cc*” leia-se: “**O veículo possui três rodas, sendo duas dianteiras direcionáveis e uma traseira que o traciona através de um motor Brushless cc.**”

Página 1:

Primeiro parágrafo, linha 6, onde se lê: “...*pela necessidade de dependência da importação...*” leia-se: “...**pela necessidade de independência da importação...**”.

Página 4:

Primeiro parágrafo, linha 1, onde se lê: “...*motor Brushless cc trifásico...*” leia-se: “...**motor Brushless cc...**”

Página 10:

Terceiro parágrafo, linha 1, onde se lê: “...*potência recebida...*” leia-se: “...**densidade de potência recebida...**”

Página 48:

Primeiro parágrafo, linha 2, onde se lê: “...*máquina Brushless de corrente contínua trifásica...*” leia-se: “...**máquina Brushless cc...**”

Página 69:

Segundo parágrafo, linha 3, onde se lê: “...*cada força...*” leia-se: “...**cada força contra-eletromotriz...**”

Página 76:

Segundo parágrafo, linha 1, onde se lê: “...*máquina Brushless cc trifásica...*” leia-se: “...**máquina Brushless cc...**”

Página 79:

Primeiro parágrafo, linha 6, onde se lê: “...*tendo uma espessura aproximada de 1mm*” leia-se: “...**tendo uma espessura aproximada de 0.3mm...**”

Página 107:

Terceiro parágrafo, linha 1, onde se lê: “...*motor Brushless trifásico de corrente contínua ...*” leia-se: “...**motor Brushless cc...**”

INCLUSÃO:

Inclusão das páginas 7 e 8 em anexo.

anos 60, devido ao aumento da preocupação com a qualidade do ar, a GM reativou suas pesquisas em veículos com sistema de propulsão elétrica e híbrida.

Ainda segundo RAJASHEKARA (1994) e EHSANI et al. (1997), devido ao embargo do petróleo pelos Árabes no início da década de 70, o desenvolvimento em veículos elétricos foi impulsionado, mas com a queda do preço da gasolina no final da década, o interesse em veículos elétricos diminuiu proporcionalmente. Nos anos 80, preocupações com os problemas ambientais fizeram com que os esforços no desenvolvimento de veículos elétricos voltassem à tona. A GM projetou e comercializou no início dos anos 90 o veículo GM IMPACT, visando o avanço da tecnologia do sistema de propulsão e fabricação em larga escala.

Em 1995, a GM começou a comercializar o veículo EV-7, atendendo regras impostas por alguns estados norte-americanos, como descritas por CHANN; CHAU (1997) e EHSANI et al. (1997), onde por exemplo, o estado da Califórnia, estabeleceu regras que determinam que, de forma progressiva, 52% de todos os veículos comercializados neste estado devem ter baixa emissão de poluentes, devendo em 1998, 2% ser de veículos de emissão zero de poluição, e em 2003 atingir 10% de toda a frota comercializada. Em outubro de 1991, outros nove estados americanos adotaram as então denominadas “Regras da Califórnia”, e atualmente alguns países estudam medidas semelhantes.

Segundo EHSANI et al. (1997), os veículos tradicionais com motores de combustão interna, são a maior fonte de poluição urbana, e de acordo com Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana, tais veículos contribuem com 40% a 50% do ozônio lançado

na atmosfera, 80% a 90% do monóxido de carbono e 50% a 60% das toxinas encontradas nas áreas urbanas.

O grande problema dos veículos elétricos é o seu baixo rendimento, assim, para melhorar a eficiência dos veículos elétricos diversas pesquisas estão em andamento, visando principalmente alcançar uma bateria que possua uma capacidade energética maior, sem com isso acrescentar-se peso ao veículo. Segundo SHIMIZU et al. (1997), pesquisas para se obter um menor coeficiente de arrasto, estão trazendo novos conceitos de projetos aerodinâmicos para os veículos, assim como a utilização de novos materiais, desenvolvimento de novos motores e de novos sistemas de acionamentos. O atual estágio de desenvolvimento em veículos elétricos apresenta um novo conceito aerodinâmico para veículos elétricos, denominados por "Eco-Vehicle" (EV). Justificando que o uso de veículos elétricos são limitados no momento, devido ao seu pouco desempenho e alto custo, os autores propõem a melhoria do desempenho dos veículos elétricos, associados às vantagens já conhecidas, como pequena manutenção e silêncio proporcionado ao motorista. Os EVs são veículos de dois lugares, com um banco na frente (motorista) e um atrás (passageiro), assim, este arranjo permite uma melhoria no desempenho, devido ao baixo arrasto aerodinâmico e baixo peso, além de maior segurança devido à grande distância entre a arca frontal e os ocupantes. A melhora do desempenho é ainda alcançada utilizando sistemas elétricos otimizados e materiais especiais para a construção do veículo.

Quanto às novas tecnologias empregadas no "Eco-Vehicle", SHIMIZU et al. (1997), destacam as seguintes:

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

RESUMO

“ABSTRACT”

1	INTRODUÇÃO.....	01
2	ENERGIA FOTOVOLTAICA E VEÍCULOS ELÉTRICOS.	05
2.1	Introdução.....	05
2.2	Evolução dos Veículos Elétricos.....	06
2.3	Energia Fotovoltaica.....	09
2.4	Veículos Solares e a World Solar Challenge.....	12
2.4.1	Regulamentos de Competição da WSC.....	15
3	O VEÍCULO POLI-SOLAR.....	17
3.1	Características Mecânicas.....	17
3.1.1	Aerodinâmica.....	19
3.1.2	Chassi e Carenagem.....	20
3.1.3	Suspensão Dianteira e Traseira.....	21
3.1.4	Rodas, Pneus e Freios.....	22
3.2	Sistema Elétrico.....	23
4	MODELAGEM DO SISTEMA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA.....	26
4.1	Sistema de Conversão Fotovoltaica.....	26
4.2	Modelagem da Célula Solar.....	29
4.2.1	Simulações do Modelo da Célula Solar.....	30
4.3	Modelagem do Conversor.....	33
4.3.1	Simulações do Modelo do Painel Solar e Conversor.....	35
4.3.2	Modelo da Malha de Controle.....	41
5	MODELAGEM DO ELEVADOR DE TENSÃO REGENERATIVO.....	47
5.1	Fluxo Energético.....	47
5.2	Modelagem do Elevador de Tensão Regenerativo.....	50
5.2.1	Simulações do Modelo do Elevador de Tensão.....	52

6	MODELAGEM DO SISTEMA DE ACIONAMENTO.....	56
6.1	Brushless e Sistema de Acionamento.....	56
6.1.1	Revisão Sobre Motor Brushless.....	56
6.1.2	Comutação do Motor Brushless.....	59
6.2	Modelagem do Motor Brushless e Sistema de Acionamento.....	64
6.2.1	Modelagem dos Circuitos Equivalentes.....	65
6.3	Simulação do Motor Brushless e do Sistema de Acionamento.....	69
7	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	77
7.1	Painel Solar.....	77
7.2	Sistema Elétrico.....	80
7.2.1	Rastreador do Ponto de Potência Máxima.....	80
7.2.2	Elevador de Tensão Regenerativo.....	84
7.2.3	Sistema de Controle e Acionamento do Motor.....	85
7.2.4	Inversor Trifásico.....	93
7.2.5	Computador de Bordo.....	93
8	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	96
8.1	Modelo Energético do Poli-Solar.....	96
8.1.1	Fatores Energéticos.....	97
8.2	Estratégia de Acionamento.....	99
8.3	Proposta de Modelo Energético.....	100
8.4	Informações Obtidas na WS.....	104
9	CONCLUSÕES.....	106
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
10.1	Bibliografias Recomendadas.....	112
	APÊNDICE A.....	i
	APÊNDICE B.....	iii
	APÊNDICE C.....	vi
	APÊNDICE D.....	vii

LISTA DE FIGURAS

3.1	Imagem do veículo Poli-Solar, gerada por CAD.....	18
3.1	Imagem do veículo Poli-Solar, gerada por CAD.....	18
3.2	Fotografia do veículo Poli-Solar.....	18
3.3	Características do veículo solar.....	19
3.5	Chassi do Poli-Solar.....	20
3.5	Chassi do Poli-Solar com suspensão dianteira e traseira.....	22
3.6	Sistema elétrico do Poli-Solar.....	23
4.1	Método de procura para maximizar a potência no painel solar.....	27
4.2	Características elétricas para uma célula solar de 15% da ASE.....	28
4.3	Resultado da simulação o modelo da célula solar, variando λ e com $T=25^{\circ}\text{C}$	32
4.4	Resultado da simulação do modelo da célula solar, variando-se T e com $\lambda=100\text{mW/cm}$	32
4.5	Painel solar ligado a um conversor “boost”.....	33
4.6	Conversor “boost”.....	34
4.7	Diagrama de blocos do modelo implementado no Simulink	35
4.8	Gráfico da potência resultante da simulação em malha aberta, variando-se a carga R , $T=25^{\circ}\text{C}$ e $\lambda=100\text{mW/cm}^2$	36
4.9	Gráfico (potência x Razão cíclica) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=0^{\circ}\text{C}$	37
4.10	Gráfico (Potência de Saída x Potência de Entrada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=0^{\circ}\text{C}$	37
4.11	Gráfico (Impedância de Saída Normalizada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=0^{\circ}\text{C}$	38
4.12	Gráfico (Potência x Razão cíclica) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=25^{\circ}\text{C}$	38
4.132	Gráfico (Potência de Saída x Potência de Entrada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=25^{\circ}\text{C}$	39
4.14	Gráfico (Impedância de Saída Normalizada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=25^{\circ}\text{C}$	39
4.15	Gráfico (Potência x Razão cíclica) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=60^{\circ}\text{C}$	40
4.16	Gráfico (Potência de Saída x Potência de Entrada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=60^{\circ}\text{C}$	40
4.17	Gráfico (Impedância de Saída Normalizada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=60^{\circ}\text{C}$	41
4.18	Diagrama de blocos do RPPM.....	42
4.19	Fluxograma completo do sistema de conversão fotovoltaica e do algoritmo de controle.....	43
4.20	Degrau de luminosidade λ de 50 para 100 mW/cm^2 , $T=60^{\circ}\text{C}$ e $R=100\Omega$	44
4.21	Degrau de temperatura de 25 para 60 $^{\circ}\text{C}$, $\lambda=100\text{mW/cm}^2$ e $r=100\Omega$	45
4.22	Degrau de carga de 25 para 50 Ω , $\lambda=100\text{mW/cm}^2$ e $T=60^{\circ}\text{C}$	46
4.23	Degrau de carga de 50 para 100 Ω , $\lambda=100\text{mW/cm}^2$ e $T=60^{\circ}\text{C}$	46

5.1	Fluxo de energia elétrica em veículo solar.....	49
5.2	Circuito elevador de tensão regenerativo.....	50
5.3	Diagrama de blocos implementado no Simulink.....	52
5.4	Elevador de Tensão alimentando uma carga de 5Ω	53
5.5	Corrente no indutor e chaveamento do transistor T1.....	54
5.6	Degrau de carga de 5Ω para 10Ω	54
5.7	Sistema operando em modo regenerativo.....	55
6.1	Seção transversal de um motor Brushless de corrente contínua.....	59
6.2	Seção transversal de um motor cc com comutador.....	60
6.3	Formas de onda da seqüência de chaveamento dos transistores da ponte trifásica, fluxo, força contra-eletromotriz, correntes e torques.....	63
6.4	Ponte trifásica de um inversor típico para acionamento de motor Brushless cc.....	63
6.5	Tabela dos chaveamentos dos transistores nos períodos e transitórios.....	64
6.6	Circuito equivalente da condução dos transistores do período I.....	66
6.7	Circuito equivalente do transitório do período I para o período II.....	67
6.8	Implementação no Simulink do modelo do motor Brushless.....	69
6.9	Bloco da seqüência de chaveamento dos transistores do inversor.....	70
6.10	Bloco da força contra-eletromotriz.....	71
6.11	Modelo da máquina Brushless.....	71
6.12	Forma de onda das forças contra-eletromotrizes ea, eb e ec.....	72
6.13	Forma de onda das forças contra-eletromotrizes com a máquina em aceleração.....	73
6.14	Forma de onda das correntes ia, ib, e ic.....	73
6.15	Torque elétrico e torque de carga.....	74
6.16	Resposta das Velocidades mecânica e elétrica para degrau de torque.....	74
6.17	Diagrama de blocos do sistema de acionamento e controle do motor Brushless.....	75
6.18	Resposta de velocidade para um degrau de torque negativo.....	75
6.19	Resposta de velocidade para um degrau de torque positivo.....	76
7.1.	Disposição das células solares sobre a superfície do Poli-Solar.....	77
7.2	Montagem de um conjunto de células solares ligadas serialmente.....	78
7.3	Exemplo de um painel solar montado com os diodos de proteção conectados.....	79
7.4	Diagrama de blocos do sistema elétrico do Poli-Solar.....	80
7.5	Circuito de potência do RPPM.....	81
7.6	Diagrama de blocos do fluxograma do procedimento de procura da razão cíclica ótima.....	82
7.7	Chaveamento do transistor, corrente do painel solar e corrente na bateria....	83
7.8	Varição da intensidade solar (λ) e a correspondente alteração da corrente..	84
7.9	Elevador de tensão regenerativo.....	85
7.10	Níveis de tensão do elo cc, mostrando quando a regeneração ocorre.....	86
7.11	Resultado experimental do elevador de tensão alimentando a máquina Brushless.....	87
7.12	Resultado experimental do elevador de tensão regenerando no primeiro nível.....	87

7.13	Resultado experimental do elevador de tensão regenerando no segundo nível.....	88
7.14	Resultado experimental. Elevador de tensão desligado durante a regeneração.....	89
7.15	Diagrama de blocos do sistema de controle do acionamento da máquina Brushless cc.....	90
7.16	Resultado experimental. Comando de torque positivo (+15Nm), velocidade constante (650 RPM).....	91
7.17	Resultado experimental. Comando de torque negativo (-15Nm), velocidade constante (650 RPM).....	91
7.18	Resultado experimental. Comando de velocidade constante (+250 RPM) e resposta do torque da máquina.....	92
7.19	Resultado experimental. Tensão e corrente na máquina em regime permanente.....	92
7.20	Diagrama de blocos do computador de bordo.....	94
7.21	Diagrama do sequenciamento de operação do Poli-Solar.....	95
8.1	Diagrama de conversão energética.....	97
8.2	Diagrama de conversão fotovoltaica.....	97
8.3	Representação do modelo da Esfera Celeste.....	104
8.4	Gráficos referentes à luminosidade em duas rotas Australianas.....	105

RESUMO

Este trabalho descreve um avançado controle de um sistema de acionamento para um veículo movido à energia solar, que participou de uma competição de veículos solares na Austrália. O sistema de controle extrai a máxima potência elétrica de oito painéis solares, que cobrem toda a superfície do veículo, através de controladores baseados em microprocessadores, que buscam continuamente a potência máxima para cada painel solar. O sistema de propulsão é composto por duas rodas dianteiras direcionáveis e uma roda traseira que traciona o veículo através de controle de acionamento de um motor Brushless cc. O sistema realiza uma seqüência de “start-up” e “shutdown”, possibilita o controle de torque ou de velocidade; possui um computador de bordo para monitoração do sistema e comunicação; possibilita uma estratégia de corrida, de forma a otimizar a energia gerada e consumida. Os sistemas de conversão fotovoltaica, elevador de tensão, e acionamento são modelados, simulados e implementados. Os resultados são apresentados e os resultados são discutidos.

ABSTRACT

This work describes an advanced drive system control for a solar powered vehicle. The drive system control extracts the maximum electrical power from a distributed solar array that covers the surface of the vehicle, with distributed based peak power tracker controllers for each individual solar panel. The vehicle propulsion has two steering wheels and one propulsion wheel based on a brushless dc machine drive control. The system is capable to sequence from start-up to shutdown, is torque or speed controlled, has a on-board computer for system monitoring and communication for energy management in the race strategy which optimizes the energy management. The photovoltaic conversion, step-up voltage, and driver systems are modeled, simulated and implemented including discussions and analysis of the results.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Soluções para geração de energia alternativa estão tendo forte atenção nos últimos anos, devido à necessidade de fontes limpas, seguras e renováveis. A geração fotovoltaica, térmica, eólica ou biomassa, possui muita aceitação por parte da sociedade, devido aos problemas de segurança e poluição ambiental dos sistemas convencionais de geração. Além disso, os veículos elétricos estão sendo alvo de intensas pesquisas pelos mesmos fatores e pela necessidade de dependência da importação de petróleo. Adicionalmente, há a necessidade contínua do aumento de geração de energia devido ao crescimento populacional e industrial.

Alguns países têm iniciado políticas visando o desenvolvimento de sistemas de energias alternativas. O Brasil, tem gradualmente incluído em seus cursos de graduação e pós-graduação, atividades educacionais relacionadas ao estudo de soluções aplicando energias alternativas. Dentre as atividades da Escola Politécnica da USP (EPUSP), a “World Solar Challenge” (WSC), uma competição de veículos solares através do deserto australiano, foi identificada como uma forma de se motivar estudantes no envolvimento de estudos e projetos em tecnologia de energia solar e construção de veículos elétricos.

Este trabalho descreve um avançado sistema de controle e acionamento para um

veículo movido à energia solar, desenvolvido pela EPUSP, denominado Poli-Solar, que participou da WSC. O seu sistema elétrico extrai a máxima potência de oito painéis solares, que cobrem toda a superfície do veículo, através de controladores baseados em microprocessadores, que buscam continuamente a potência máxima para cada painel solar. O sistema de acionamento utiliza um inversor baseado em IGBTs e “gate drives”, e seu sistema de controle foi totalmente implementado em “hardware”.

Uma análise dinâmica do sistema fotovoltaico é realizada neste trabalho, apresentando a modelagem matemática e estudos de simulação. Apresenta-se também a modelagem e simulação de um circuito elevador de tensão regenerativo, que alimenta o inversor do sistema de acionamento, e do sistema de controle com o inversor associado ao motor Brushless cc.

A implementação de todos os sistemas elétricos são explicados e os resultados experimentais são apresentados.

O trabalho está dividido em 7 (sete) capítulos, a saber:

- Capítulo 2:

Este capítulo apresenta uma revisão histórica da evolução dos veículos elétricos, apresentando o atual estágio de desenvolvimento nas áreas de pesquisas. Os veículos solares são analisados, e a WSC bem como suas regras de competição são apresentadas, mostrando a importância de competições de veículos solares na evolução tecnológica do desenvolvimento de sistemas de conversão fotovoltaica, do aprimoramento dos sistemas de acionamento de motores aplicados à veículos elétricos e do desenvolvimentos de novos projetos aerodinâmicos.

- Capítulo 3:

O capítulo 3 apresenta o veículo elétrico movido à energia solar denominado Poli-Solar. São apresentadas as características mecânicas, suspensão, rodas, freios, direção, materiais, carenagem e formato aerodinâmico. Justifica-se a necessidade de se obter um veículo de alto desempenho através da utilização de novos conceitos aerodinâmicos e da otimização da relação peso/potência. Há introdução ao sistema elétrico do veículo, apresentando seus blocos básicos, para compreensão da operacionalidade global do sistema.

- Capítulo 4:

A modelagem completa e simulações do sistema de conversão fotovoltaica são apresentadas neste capítulo. O modelo analítico de uma célula solar, baseado em seu comportamento elétrico, foi desenvolvido permitindo que seu comportamento dinâmico fosse estudado. O modelo de um painel solar é realizado através da associação série de células solares. Este modelo associado ao de um conversor “boost” e de uma malha de controle, formam o modelo do sistema fotovoltaico, o qual foi implementado e simulado através do software Simulink/Matlab.

- Capítulo 5:

O capítulo 5 justifica a necessidade de se elevar a tensão do conjunto de baterias. A proposta de utilizar um circuito elevador de tensão regenerativo é explicado, bem como o fluxo energético que ocorre no Poli-Solar. O circuito elevador de tensão regenerativo é modelado e simulado utilizando o

Simulink/Matlab.

- Capítulo 6:

Este capítulo apresenta o motor Brushless cc trifásico utilizado no sistema de acionamento. Uma revisão sobre motores Brushless é feita, mostrando as formas de onda para a excitação em onda quadrada. A importância da associação da seqüência de acionamento das chaves do inversor com a posição do rotor do motor é abordada. O modelo do motor Brushless associado ao inversor é apresentado. Posteriormente este modelo é implementado e simulado através do Simulink/Matlab.

- Capítulo 7:

Neste capítulo é apresentado todo o sistema elétrico do Poli-Solar. A implementação dos oitos painéis solares sobre o veículo é abordada, mostrando suas características construtivas. O circuito elétrico desenvolvido para extrair a máxima potência de cada painel solar é analisado e os resultados experimentais são apresentados. O circuito elevador de tensão regenerativo é apresentado mostrando seu comportamento dinâmico através dos resultados experimentais. O sistema de acionamento e controle é explicado, mostrando como o inversor foi construído, e como funciona o circuito de controle desenvolvido em “hardware”. Resultados experimentais obtidos através de testes em laboratório são apresentados.

- Capítulo 8:

Este capítulo apresenta uma proposta de continuidade do trabalho. Uma abordagem sobre a metodologia para implementação de um sistema de modelo energético para o Poli-Solar é discutida.

CAPÍTULO 2

ENERGIA FOTOVOLTAICA E VEÍCULOS ELÉTRICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Os derivados de petróleo são considerados os principais poluentes do mundo moderno, principalmente a gasolina, que por ser utilizada na área automobilística, é a grande responsável pela geração de monóxido de carbono, o principal poluente atmosférico das grandes cidades.

Por vários anos, entidades governamentais e a iniciativa privada, despendem grandes recursos no sentido de desenvolver um veículo urbano que seja menos poluente ou até mesmo não poluente, e que ao mesmo tempo seja viável economicamente e comercialmente. A maioria das propostas apresentadas são de veículos elétricos, híbridos ou movidos à célula-combustível.

Atualmente, os veículos elétricos estão se tornando uma realidade na substituição dos tradicionais veículos movidos por motores a explosão. Dentre os diversos tipos e modelos de veículos elétricos, um grupo está ganhando atenção especial: os veículos solares.

Os veículos solares são basicamente veículos elétricos que utilizam somente a energia solar para acionar seu motor elétrico e/ou carregar suas baterias. Como atualmente as células solares, são elementos caros e de baixa eficiência, os veículos solares necessitam ser projetados de forma a obter o melhor desempenho possível em aerodinâmica, conversão fotovoltaica, relação peso/potência das baterias, eficiência do motor e seu sistema de acionamento e controle, e peso do veículo o qual depende diretamente dos materiais utilizados em sua confecção. Além disso, as células solares são extremamente frágeis e por serem posicionadas sobre o veículo devem possuir um encapsulamento que as proteja de impactos e, ao mesmo tempo, ser translúcido com o menor índice de reflexão possível. Tais características, singulares de veículos solares, os tornam um excelente laboratório de pesquisas a engenharia elétrica e mecânica.

2.2. EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Veículos elétricos são estudados e aprimorados desde o início do século XX. RAJASHEKARA (1994) apresenta uma revisão da evolução do desenvolvimento dos veículos elétricos na General Motors. As pesquisas se iniciaram quando a indústria de caminhões GMC, em 1916, produziu uma pequena quantidade de caminhões elétricos usando baterias de chumbo-ácido. Com o desenvolvimento da partida elétrica para motores à gasolina, o interesse no desenvolvimento de veículos elétricos diminuiu. Em 1953, a GM construiu o veículo "Firebird I", o primeiro automóvel movido com uma turbina a gás. Nos

- Sistema de acionamento para motores “in-wheel” (embutidos nas rodas), contendo dois motores Brushless cc, individualmente para cada roda traseira;
- Posicionamento das baterias no piso do veículo, de forma a se otimizar o espaço e posicionar o centro de massa do veículo adequadamente.
- Um projeto específico para o gerenciamento do sistema de acionamento e controle.

As baterias utilizadas são do tipo chumbo-ácido seladas. Um sistema de cabeamento e conexão para as baterias foram projetadas de forma a evitar perdas e problemas elétricos, e facilitar a troca.

Como conceitos adicionais são consideradas as possibilidades de se incorporar ao veículo um painel fotovoltaico no teto ou no capô, para auxiliar na carga das baterias, dependendo do “design” final e do custo desta implementação. Por fim, um sistema de navegação automática, utilizando sensores de proximidade de pedestres e de outros veículos estão sendo propostos.

2.3. ENERGIA FOTOVOLTAICA

Grande atenção para soluções utilizando energias alternativas foram dadas nos últimos anos, devido às necessidades de fontes de energias limpas, seguras e renováveis. A geração de energia por meio fotovoltaico, térmico, eólico e por biomassa têm muita aceitação por parte da sociedade devido a diversos problemas de segurança e poluição

ambiental dos sistemas convencionais de geração de energia. Adicionalmente, há a necessidade de maior produção devido ao crescimento populacional e industrial, necessitando de soluções com boa relação custo-benefício.

O Brasil, que possui a base de produção de energia sustentada por mananciais hidráulicos, não foge à regra, pois apesar de ainda possuir alguma reserva em sua bacia hidrográfica, encontra sérias dificuldades em aumentar e distribuir sua produção. Desta forma, a crescente demanda de energia exige uma busca contínua de novas fontes alternativas.

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à conversão fotovoltaica tem o sentido de torná-la mais viável economicamente, pois seu potencial energético é enorme: a potência recebida do sol, ao nível do mar, é de aproximadamente 1 kW/m^2 .

A transformação da energia solar em energia elétrica é realizada por células solares, e tal transformação é denominada por conversão fotovoltaica. A conversão fotovoltaica é realizada através da energia cedida aos fótons para produzir potencial elétrico em uma junção de materiais de semicondutores do tipo PN. Os semicondutores mais utilizados na confecção destes dispositivos são o silício e o selênio.

Para que esta energia elétrica seja eficientemente aproveitada, ela deve ser armazenada em bancos de baterias ou entregue à rede elétrica através de sistemas de conversão elétrica de potência, portanto, sofisticados sistemas devem ser desenvolvidos para viabilizar e melhorar o rendimento de tal operação.

As células solares apresentam limitações físicas relacionadas ao seu processo de fabricação, como baixo rendimento de conversão fotovoltaica, possuindo atualmente

rendimentos não superiores a 29%, corrente na ordem de 3A e tensão de aproximadamente 0.7V. Comercialmente estão disponíveis células solares de 12% a 22%. Em relação aos custos, as células solares possuem preços extremamente elevados, principalmente para células de rendimentos maiores, por exemplo, para uma célula de 15% seu preço no Brasil é de aproximadamente U\$ 15,00. Além das limitações físicas, a conversão fotovoltaica sofre grandes variações de potência com a variação de temperatura e do nível de incidência de insolação sobre a célula, que por sua vez são dependentes das condições climáticas, do dia e da hora. Essas características conduzem à necessidade da interligação da célula solar com um sistema que consiga transferir a máxima potência disponível para a carga, sob quaisquer condições de luminosidade e temperatura, para permitir que a amortização do investimento financeiro em um sistema fotovoltaico seja acelerada.

Para o aproveitamento da energia solar em energia elétrica em escala comercial, utilizam-se painéis solares, que são compostos por células solares ligadas em série, onde o número de células depende da potência desejada. A tensão é dependente da quantidade de células ligadas serialmente, já a corrente é um fator inerente à construção da célula solar, dependente de suas características.

Como a potência fornecida pelas células está diretamente relacionada com a incidência da luz solar e temperatura, que dependem das condições climáticas, como nuvens e chuvas, e como a potência também varia com o ângulo de incidência da energia luminosa sobre o painel solar, conclui-se que a potência total dependerá da estação do ano, e das coordenadas geográficas (latitude e longitude) onde o painel solar está instalado.

A potência extraída do painel solar pode ser diretamente direcionada à carga. Já em caso de armazenamento em baterias, pelo fato da corrente elétrica fornecida pelo painel solar ser contínua, existe um elo em corrente contínua entre elas, porém, caso o objetivo seja a alimentação monofásica ou trifásica, a transformação de tensão contínua para alternada deve ser realizada por conversores de potência adequados.

Como o rendimento da conversão fotovoltaica é relativamente baixo, a máxima potência disponível no painel solar deve ser extraída com o mínimo de perdas, ou seja, com a máxima eficiência. A melhor transferência de potência possível, atingindo a máxima eficiência, é alcançada quando há casamento de impedância entre o painel solar e sua carga.

2.4. VEÍCULOS SOLARES E A WORLD SOLAR CHALLENGE

Os veículos solares são veículos elétricos que utilizam somente a conversão fotovoltaica para carregar suas baterias e mover sua propulsão.

Segundo PATTERSON (1990), o desenvolvimento de um sistema elétrico para veículos solares oferece alguns desafios interessantes no uso dos sistemas de eletrônica de potência. O primeiro critério de projeto é obter a máxima eficiência possível com o mínimo peso. A eficiência é a combinação da integração dos componentes do sistema com um determinado trajeto, levando em consideração a superfície e seus gradientes, a previsão das condições meteorológica e a estratégia de acionamento.

Veículos movidos à energia solar têm sido desenvolvidos e testados em vários países do mundo. Como forma de incentivar o aprimoramento desses tipos de veículos, existem várias competições em diversos países como a Austrália, Estados Unidos, Japão e Suíça. Segundo ROCHE (1997), tais projetos de veículos para competições têm contribuído para melhorar o desempenho da conversão fotovoltaica, coeficiente aerodinâmico, baterias, motores e seus sistema de acionamento e controle.

A mais importante competição internacional de veículos solares ocorre na Austrália, sendo denominada por “World Solar Challenge” (WSC). Como descrito por KYLE (1990) e ROCHE (1997) esta competição é realizada a cada três anos, tendo como percurso todo o deserto australiano. A largada da corrida ocorre na cidade de Darwin, no extremo norte, e a chegada ocorre na cidade de Adelaide.

Segundo ROCHE et al. (1997) e KYLE (1991), o idealizador desta competição foi um australiano, visionário e aventureiro, Hans Tholstrup. No início dos anos 80 Tholstrup tornou-se um ativista dedicado à proteção ambiental, e incentivador de aplicações de energias renováveis, visando a diminuição da poluição do ar. Em 1983 ele dramatizou sua causa construindo o primeiro veículo solar, atravessando a Austrália de oeste para leste entre Perth e Sidney, durante 20 dias de viagem. Este veículo foi denominado “Quiet Achiever” e fez a trajetória a uma velocidade média de 23 Km/h. Seu sucesso encorajou-o a criar uma competição que pudesse estimular o interesse mundial em pesquisa de aprimoramento do uso da energia solar. A primeira competição ocorreu em 1987, tendo como vencedor o veículo “Sunraycer” da General Motors, a segunda foi em 1990 e o vencedor foi o veículo “Spirit of Biel II” da Universidade de Biel da Suíça. A 3ª WSC

realizada em 1993 contou com a participação de veículos desenvolvidos por grandes empresas automobilísticas como a Honda (vencedora), Toyota, Nissan, Kia, e por universidades dos Estados Unidos, Austrália, Japão, Suíça e Canadá, e por grupos independentes, entre os quais um de brasileiros que competiram com o primeiro veículo solar brasileiro, denominado Banana-Enterprise,

Em 1996 a 4ª WSC, contou com a participação de 40 equipes de diversos lugares do mundo. Novamente muitas empresas automobilísticas participaram, dentre as quais a Honda, que novamente foi a vencedora, com um investimento de aproximadamente 20 milhões de dólares. Muitos países foram representados por universidades, como por exemplo, a Universidade de Biel, segunda colocada, e universidades dos Estados Unidos, Inglaterra, Austrália, Dinamarca, Itália, França, Japão, México, Malásia e Brasil. O Brasil foi representado por duas equipes, novamente uma equipe independente com o veículo SunBA, e a equipe da Escola Politécnica da USP, com o veículo Poli-Solar.

O veículo solar típico que participa dessa competição possui uma potência elétrica aproximada de 1500 Watts, fornecido por um painel solar composto por aproximadamente 800 células solares, possui três rodas, duas dianteiras responsáveis pela dirigibilidade, e uma traseira, onde é fixado um motor de aproximadamente 3Hp, responsável pela tração. O sistema de freio pode ser hidráulico, ou acionado por manetes e cabos de aço. O veículo pode ser construído para um único ocupante ou para dois (um piloto e um passageiro). O material utilizado na construção é normalmente um composto de fibra de carbono, fibra de vidro, ou "Honey-Comb". O veículo é projetado para ter um baixo arrasto aerodinâmico, normalmente alcançado através de um bom projeto aerodinâmico, um baixo atrito de

rolamento, sendo normalmente minimizado com a utilização de mancais de baixo atrito e pneus adequados, uma massa pequena, minimizada com um bom projeto estrutural e utilizando materiais modernos como ligas metálicas especiais, uma alta eficiência na conversão de energia, obtida através da utilização de células solares de alto rendimento, circuito de conversão, motor de alta eficiência e circuitos de gerenciamento de energia.

2.4.1. REGULAMENTOS DE COMPETIÇÃO DA WSC

O regulamento dessa competição permite que somente energia elétrica, gerada através da energia solar, possa ser utilizada, e que o excedente seja armazenada em baterias. Os veículos sofrem restrições quanto às suas dimensões, limitando-se desta forma a capacidade energética. As máximas dimensões do veículo, impostas pelo regulamento, são para veículos de 2 lugares de seis metros de comprimento por dois de largura, com uma altura mínima de 1 metro. Para veículos de 1 passageiro são 4 metros de comprimento por 2 de largura e 1 de altura. O veículo deve possuir sistemas de sinalização e segurança, como freio, luz de freio, pisca, cinto de segurança, e possuir boa estabilidade aerodinâmica. O veículo passa por diversos testes para se qualificar para a competição, entre os quais são verificadas suas dimensões e os itens acima descritos. Para a qualificação de largada, o veículo faz um teste de velocidade que o posiciona no “grid”, sendo que, veículos que não atingirem uma velocidade mínima de 40 Km/h são desclassificados. Para o teste de estabilidade aerodinâmica deve-se cruzar, à uma velocidade mínima de 40 km/h, um caminhão composto por três carretas, de aproximadamente 50 metros de comprimento,

vindo no sentido contrário à uma velocidade de 80 Km/h. Há ainda o teste de frenagem, onde o veículo, rodando a uma velocidade mínima de 40 km/h, deve parar totalmente numa distância máxima de 30 metros.

Estes testes são realizados para verificar as condições de segurança dos veículos solares, uma vez que a corrida é realizada em uma auto-estrada, com excelente pavimento asfáltico, onde o tráfego flui normalmente, e a presença de caminhões é constante. A distância percorrida é de exatamente 3.010 km, cruzando todo o deserto australiano.

CAPÍTULO 3

O VEÍCULO POLI-SOLAR

3.1. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

Segundo SIMÕES (1997), a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) tem gradualmente incluído em seus cursos de graduação e pós graduação atividades educacionais relacionadas a energias alternativas. Neste sentido, a WSC foi identificada como uma forma singular de motivar estudantes no envolvimento em estudos e projetos em tecnologia de energia solar e construção de veículos elétricos. Assim, o Departamento de Engenharia Mecânica, projetou e desenvolveu um veículo elétrico movido à energia solar denominado Poli-Solar. Este veículo possui a capacidade de transportar dois ocupantes, estando suas dimensões, características mecânicas e elétricas dentro das normas estabelecidas pela WSC. Em 1996 este veículo participou da 4ª edição desta competição, como mencionado por ROCHE et al. (1997).

A figura 3.1 apresenta uma imagem computacional do Poli-Solar, a figura 3.2 uma fotografia e a figura 3.3 uma tabela contendo suas principais características.

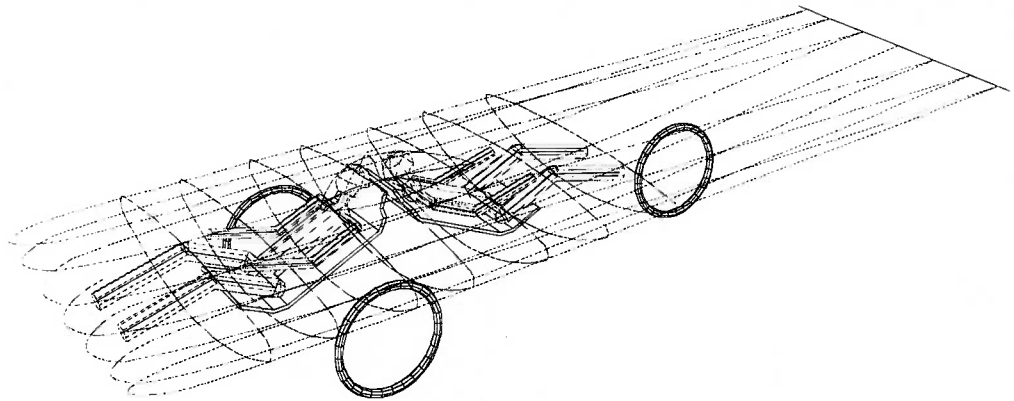


Figura 3.1: Imagem do veículo Poli-Solar, gerada por CAD.



Figura 3.2 Fotografia do veículo Poli-Solar.

Dimensões	6 m x 2 m x 1m
Área da Superfície Solar	12 m ²
Ocupantes	2
Suspensão Dianteira	Duplo A
Suspensão Traseira	Pro-Link
Direção	Acionada por Cabos de Aço
Potência Solar	1.800 W
Capacidade da Bateria	200 Ah
Velocidade Máxima	90 Km/h
Controle dos Painéis	Microcontrolador PIC16C74
Controle do Acionamento	Controle Analógico
Computador de Bordo	Microcontrolador 68HC11
Gerenciamento Energético	Baseado em Captura Energética

Figura 3.3 Características do veículo solar.

3.1.1. AERODINÂMICA

Para um veículo em movimento em uma estrada plana, a maior força que impede o seu movimento é a resistência do ar, que em média chega a 80% do arrasto total, sendo que os 20% restantes são relacionados aos atritos de rolamentos. Neste sentido, é imprescindível que para um veículo de alto rendimento, obtenha-se um bom projeto aerodinâmico. Neste contexto, para o projeto aerodinâmico, foi utilizado um perfil simétrico com baixo coeficiente de arrasto e a menor área frontal possível.

Como pode ser observado através da figura 3.2, na parte superior do veículo há uma redoma de acrílico, ou “canopy”, que permite ao piloto conduzir o veículo com boa

visibilidade e minimizar o atrito da área frontal. Para o “canopy” possuir o menor tamanho possível, os tripulantes sentam-se de costas um para o outro, como mostrado através da figura 3.1.

3.1.2. CHASSI E CARENAGEM

Como veículos pesados possuem menor aceleração e maior atrito de rolamento, devido às deformações nos pneus e mancais que o suportam, um veículo de alto desempenho, deve possuir bom projeto estrutural e utilizar materiais leves, rígidos e resistentes, como ligas metálicas especiais, materiais compostos, fibras de carbono e aramida.

O Poli-Solar possui um chassi tipo monocoque. Este tipo de chassi caracteriza-se por possuir a parte estrutural onde são presas as suspensões, baterias, sistema de acionamento e controle, e onde sentam-se os ocupantes. Seu projeto estrutural define a forma da superfície do veículo, que foi construída utilizando resina epóxi, reforçada por fibra de carbono e fibra de vidro, intercaladas em sete camadas, totalizando uma espessura aproximada de 3 mm. A figura 3.4 apresenta o desenho de projeto de confecção do chassi.

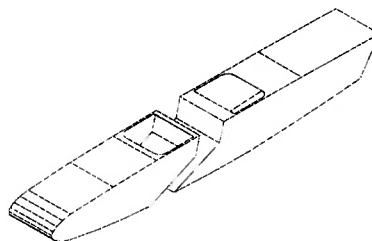


Figura 3.4 Chassi do Poli-Solar.

A carenagem do veículo também foi construída com os mesmos materiais do chassi, porém, por não se tratar de parte estrutural, foram utilizadas apenas 4 camadas. O objetivo da carenagem é dar ao veículo a forma aerodinâmica projetada e servir como suporte para o painel solar, que cobre todo o veículo, como descrito posteriormente.

Em algumas partes estruturais, sempre que possível, o aço foi substituído por alumínio, com o objetivo de diminuir o peso do veículo.

3.1.3. SUSPENSÃO DIANTEIRA E TRASEIRA

A suspensão dianteira do veículo é tipo duplo “A”, porém diferentemente das suspensões usuais deste tipo, o cubo da roda não está fixo entre os “As”, mas um pouco abaixo. O objetivo desta geometria é evitar o excesso de exposição da suspensão ao vento, evitando assim, prejudicar a aerodinâmica e fazer com que a suspensão mantenha o ponto de contato com o solo numa posição vertical, de forma que o pneu não arraste lateralmente.

A suspensão traseira é tipo “pro-link”, possui apenas um braço de sustentação, que é preso na parte posterior do chassi e ao cubo da roda. Sobre a suspensão é fixado o motor responsável pela tração do veículo, ao qual está uma polia e uma correia dentada ligada à polia da roda.

A figura 3.5 apresenta o chassi do veículo com as suspensões dianteira e traseira, e as rodas incorporadas.

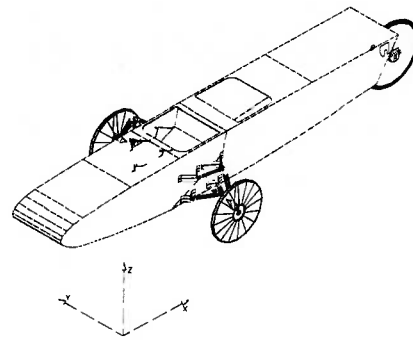


Figura 3.5 Chassi do Poli-Solar com suspensão dianteira e traseira.

3.1.4. RODAS, PNEUS E FREIOS

O sistema de direção é composto por duas rodas dianteiras, direcionáveis através de um sistema de cabos, e uma roda traseira, que traciona o veículo através do controle de acionamento de um motor Brushless cc, podendo atingir a velocidade máxima de 90 km/h, em regime permanente e no plano.

As rodas utilizadas no veículo foram construídas a partir de rodas de bicicletas (aro 26"). Os raios foram substituídos por calotas de alumínio, contendo no centro o cubo para fixação ao eixo, através de 4 parafusos. A substituição dos aros por calotas, ocorreu porque os aros da roda de bicicleta não suportam esforços laterais. Os pneus também são de bicicleta, por possuírem baixo atrito aerodinâmico e de rolamento.

Um freio mecânico tipo tambor foi instalado nas rodas dianteiras. Ele é comandado por cabos de aço através de polias, garantindo uma frenagem igual em ambas as rodas. As sapatas do freio atuam diretamente no cubo da roda, evitando assim a necessidade do uso de panela de freio, fato que ajuda a diminuir o peso do veículo.

O sistema de acionamento eletrônico provê frenagem aerodinâmica, através da inversão do torque imposto ao motor. A frenagem aerodinâmica é mais utilizada em desacelerações e operação em plano inclinado, todavia, a frenagem de segurança, para parada total é a mecânica.

3.2. SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico do veículo Poli-Solar, é apresentado através do diagrama de blocos da figura 3.6.

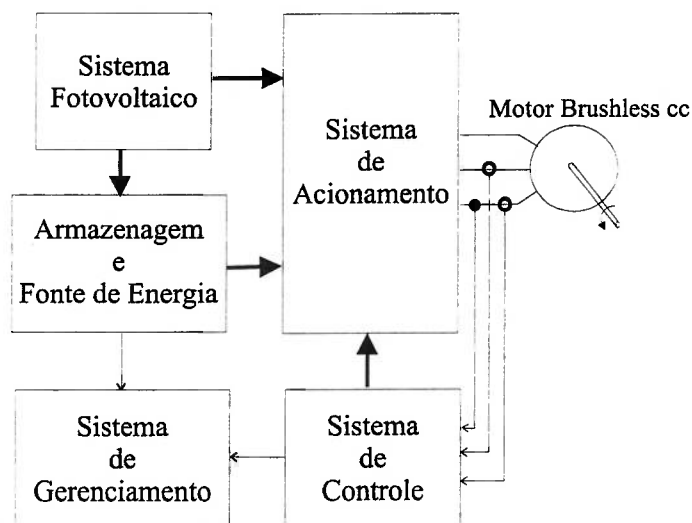


Figura 3.6. Sistema elétrico do Poli-Solar.

Como pode-se observar, o sistema é composto por cinco blocos básicos: sistema fotovoltaico, conjunto de baterias, sistema de acionamento, sistema de controle e sistema de gerenciamento.

O sistema fotovoltaico inclui todos os painéis solares do veículo. Cada painel solar está ligado a um circuito eletrônico que extrai a máxima potência do painel solar, para uma dada condição de luminosidade e temperatura, como explicado posteriormente. Esses circuitos são denominados Rastreadores do Ponto de Potência Máxima (RPPM).

Todos os oito RPPMs baseiam-se em um regular chaveado tipo “boost”, que eleva a tensão do painel para um valor adequado. Suas saídas são ligadas em paralelo, somando-se todas as correntes que serão entregues ao sistema de acionamento e/ou ao conjunto de baterias.

O conjunto de baterias é composto por vinte baterias seladas tipo chumbo-ácido de 12V e 12 A/h de fabricação da empresa UASA. Elas estão conectadas de forma a compor dois grupos de 10 baterias ligadas serialmente. Os dois grupos estão ligados em paralelo, o que permite atingir uma tensão total de 120 V, com uma capacidade aproximada de 4.800kW/h. Esta configuração permite que, caso alguma bateria esteja totalmente descarregada, ou se danifique por algum motivo, o outro grupo continue recebendo energia do sistema fotovoltaico e/ou fornecendo energia ao sistema de acionamento.

O sistema de acionamento é composto por um inversor trifásico, baseado em IGBTs (“Insulated Gate Bipolar Transistor”) e “gate drives”. O sistema de acionamento é o responsável pelo chaveamento das fases do motor Brushless cc, trabalhando com tensão do elo cc em 210 V, pois esta é a tensão nominal do motor. O sistema possui ainda circuitos de proteção como “dead time”, freio dinâmico e proteção contra sobre-tensão, como melhor explicado posteriormente.

A correta seqüência de chaveamento dos IGBTs do sistema de acionamento é

realizado pelo sistema de controle baseada numa tabela interna contida em uma memória EPROM. O sistema possui um controlador PI (proporcional e integral), fazendo o controle de torque através da reconstituição das correntes das fases do motor.

O sistema de gerenciamento é baseado em um computador de bordo, implementado através de um microprocessador, que gerencia todo o sistema, obtendo informações sobre tensão e corrente do sistema fotovoltaico e conjunto de baterias, e velocidade e torque impostos ao motor.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DO SISTEMA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

4.1. SISTEMA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

Um sistema de conversão fotovoltaica contém três subsistemas básico: painel solar, conversor de potência e um sistema de armazenagem de energia. Para armazenagem de energia em baterias há um elo em corrente contínua, o qual pode ser o alimentador principal do sistema. Todavia, para alimentação monofásica ou trifásica há transformação de corrente contínua para corrente alternada através de um inversor. ANDERSEN, ALVSTEN (1995) propõem uma aplicação residencial de baixo custo conectada à rede elétrica, BOSE et al. (1984) procura manter o fator de potência unitário e a busca de operação em potência máxima através de um microcomputador, ENSLIN, SNYMAN (1991) propõem um controlador por histerese que mantém o sistema dentro da requisição de potência ativa. A maximização de potência é explorada através de modelagem dinâmica desenvolvidas por MIDYA et al. (1996), SALAMEH, TAYLOR (1990), TEULINGS et al. (1993) e WOLF, ENSLIN (1993) e em aplicações em veículos movidos à energia solar em SULLIVAN, POWERS (1993) e PATTERSON (1990). A modelagem de painéis solares tem sido explorado na literatura, tal como apresentada por RAUSHENBACK (1976), com ênfase no

equacionamento das propriedades físicas de semicondutores, ou em modelos SPICE equivalentes.

A corrente produzida por uma célula solar é proporcional à intensidade da luz solar incidente à direção normal de sua superfície, e a tensão produzida sofre variações com a temperatura. As curvas de corrente em função da tensão para uma célula solar são similares às de diodos, assim, a máxima potência fornecida pela célula ocorre na interseção da curva tensão-corrente e uma hipérbole, para uma determinada condição de luminosidade e temperatura, como mostrada na figura 4.1. Observa-se que a máxima potência se altera com a mudança da intensidade solar e temperatura, e portanto, é necessário utilizar um circuito eletrônico que seja capaz de localizar e operar no ponto que maximiza a potência de saída da célula solar. Assim, a busca do ponto de potência máxima pode ser realizado por um circuito regulador chaveado tipo “boost” que possua controle de sua razão cíclica (“duty-cycle”) para maximizar a transferência de potência ao elo de corrente contínua.

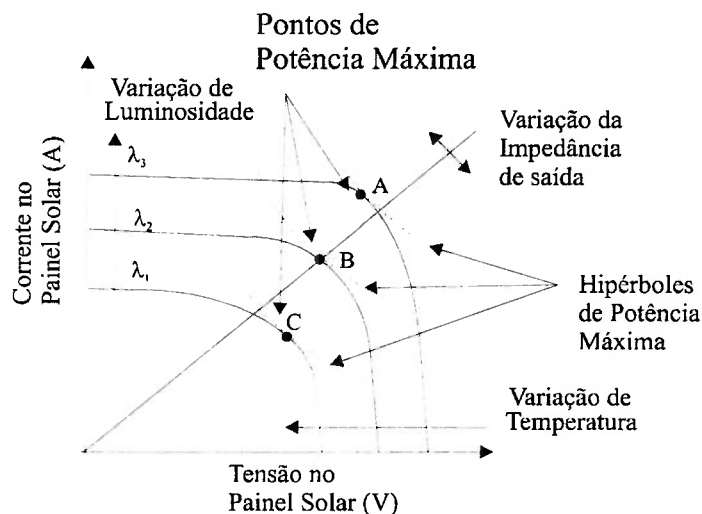


Figura 4.1. Método de procura para maximizar a potência no painel solar.

Os fabricantes de células solares, apresentam em catálogos, os gráficos relativos às características de corrente em função da tensão ($I_{c} \times V_{c}$), e a variação destes parâmetros com a intensidade de energia luminosa e temperatura. Os gráficos ($I_{c} \times V_{c}$) para uma célula solar de 15% de rendimento de fabricação da ASE são apresentados na figura 4.2, onde observa-se que a corrente fornecida pela célula solar depende das condições de luminosidade e que a tensão diminui com o acréscimo de temperatura.

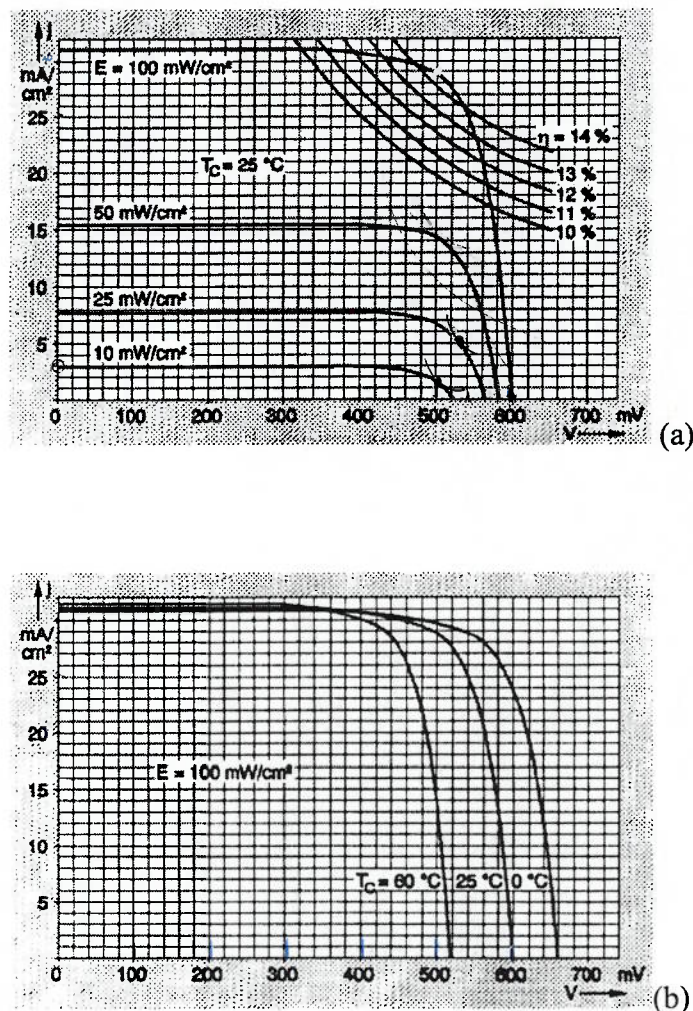


Figura 4.2. Características elétricas para uma célula solar de 15% da ASE.

(a) $I_c \times V_c$ dependente da intensidade solar (λ).

(b) $I_c \times V_c$ dependente da temperatura (T).

4.2. MODELAGEM DA CÉLULA SOLAR.

Essa seção apresenta uma modelagem analítica da célula solar utilizada no Poli-Solar, que pode ser aplicada para outros tipos de células utilizando-se da mesma metodologia. A modelagem mostra como integrar o modelo de um painel solar com um conversor, possibilitando o desenvolvimento de estratégias de controle através de simulações em computador.

Partindo-se dos dados de catálogo da empresa alemã ASE, apresentados na figura 4.2, observa-se que o comportamento matemático, que reflete tal comportamento físico, é a adição de uma função linear e de uma função exponencial, como apresentado abaixo.

$$J = J_1 + J_2 \quad (4.1)$$

$$J_1 = \frac{\lambda}{k_1} \quad (4.2)$$

$$J_2 = -k_2 e^{\alpha V + \beta T + \gamma} \quad (4.3)$$

então:

$$J = k_1 \cdot \lambda - k_2 \cdot e^{\alpha V + \beta T + \gamma} \quad (4.4)$$

Onde, J é a densidade de corrente em mA/cm², k_1 é uma constante de proporcionalidade entre a densidade de corrente e a intensidade solar, na região em que a célula solar pode ser considerada um gerador de corrente, k_2 é considerada como uma constante de valor 1 mA/cm² para ajustar a exponencial, λ é a intensidade luminosa

incidente em mW/cm^2 , α é o coeficiente de tensão (V^{-1}), β é o coeficiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é um adimensional para ajustar a curva na região em que a célula pode ser considerada um gerador de tensão variável com a temperatura. A equação (4.5) resulta da inversão algébrica de (4.4), possibilitando um modelo onde a tensão da célula depende da intensidade luminosa, da temperatura e corrente, e onde “ A_{CEL} ” representa a área da superfície de uma célula solar.

$$V = \frac{1}{\alpha} \left[\ln \left(\frac{k_1}{k_2} \lambda - \frac{i_p}{A_{\text{CEL}} k_2} \right) + \beta T + \gamma \right] \quad (4.5)$$

A equação (4.6) representa o modelo de uma única célula solar. Para compor um painel solar, deve-se levar em consideração o número total de células em série (N_{CEL}) e a resistência de contato (R_s). A associação série de células solares está apresentada na equação (4.6).

$$v_p = \sum_{j=1}^{N_{\text{CEL}}} v_j - N_{\text{CEL}} \cdot R_s \cdot i_p \quad (4.6)$$

4.2.1. SIMULAÇÕES DO MODELO DA CÉLULA SOLAR

A análise das curvas da figura 4.2, leva à conclusão que a tensão na célula solar varia $5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, assim, pode-se definir a expressão (4.7), onde τ representa o coeficiente de temperatura. Para comprovar o modelo proposto na equação (4.5), deve-se inicialmente ajustar os coeficientes. Partindo-se da observação das curvas referentes à característica

corrente por tensão, escolhe-se as coordenadas de um ponto qualquer sobre a curva. Por exemplo, as coordenadas (500,29) da curva da figura 4.2(a), com $\lambda=100$ mW/ e temperatura =25 °C.

$$\tau = 1.125 - (0.005T) \quad (4.7)$$

Substituindo-se a equação (4.7) e os valores do ponto escolhido na equação (4.4), resulta:

$$\beta = 500\alpha - 0.692$$

Através de regressão multilinear, utilizando o “software” Matlab, é possível determinar os valores que minimizam o erro quadrático médio. Os coeficientes obtidos foram: $\alpha=0.025$ e $\beta=11.566$. Assim, substituindo os valores em (4.5), obtêm-se:

$$V(I) = \frac{\ln\left(\frac{\lambda}{3.226} - J\right) + 11.566\tau}{0.025} \quad (4.8)$$

Considerando-se que a célula em estudo possui dimensões de 10cm x 10cm, ou seja $A_{CEL}=100\text{cm}^2$, a equação em função da corrente que representa a célula solar de 15% de rendimento da ASE será:

$$V = \frac{\ln\left(\frac{100}{3.226} - \frac{3.2}{100}\right) + 11.566(1.125 - (0.005T))}{0.025} \quad (4.9)$$

As figuras 4.3 e 4.4 mostram os resultados de simulação da equação (4.9), para diversos valores de intensidade luminosa e temperatura. Há uma precisão de aproximadamente 2,5% entre os valores fornecidos pelo fabricante e os do modelo.

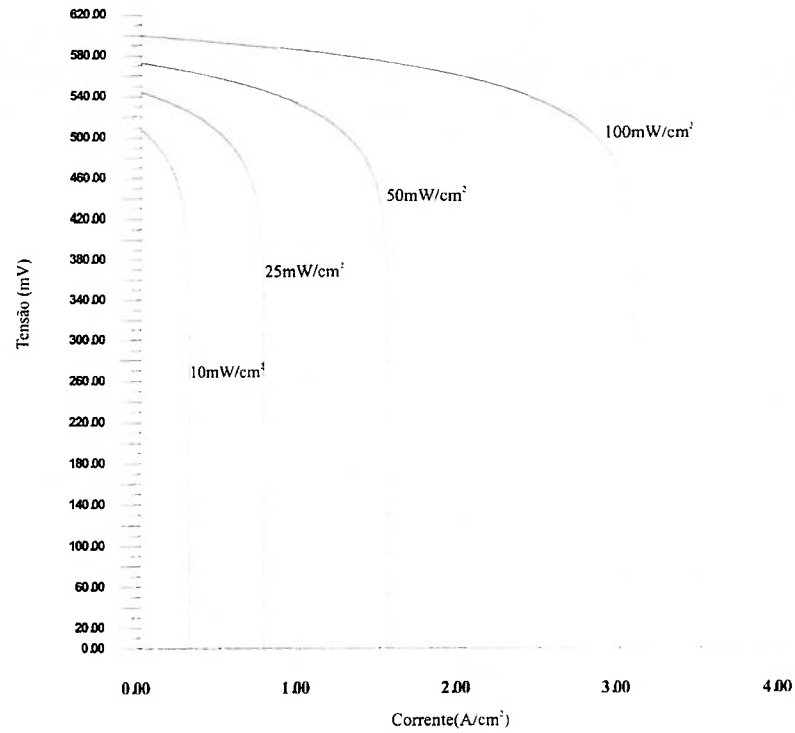


Figura 4.3. Resultado da simulação do modelo da célula solar, variando-se λ e com $T=25^\circ\text{C}$.

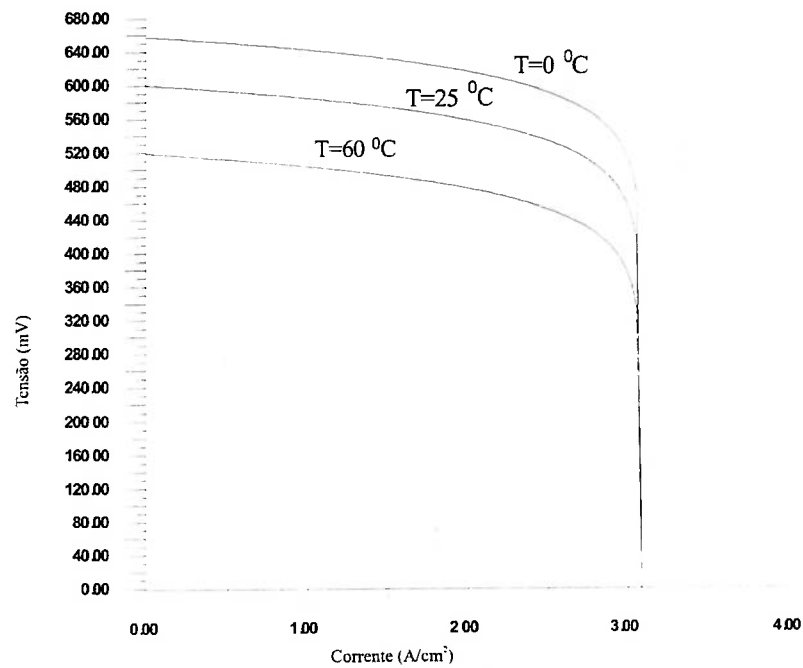


Figura 4.4. Resultado da simulação do modelo da célula solar, variando-se T e com $\lambda=100\text{mW/cm}^2$

4.3. MODELAGEM DO CONVERSOR

A utilização de um conversor tipo “boost” para maximizar a transferência de potência de um painel solar para a carga deve-se ao fato deste conversor permitir chaveamentos em uma larga faixa de frequência, fornecer tensão na saída em níveis compatíveis com a necessidade da carga, ou seja, maior que a tensão do painel, e possuir reduzidas perdas de chaveamento.

A figura 4.5 apresenta o circuito elétrico composto por um painel solar ligado a um conversor “boost”. A razão cíclica (δ) é definida como a relação entre o tempo de condução (T_{ON}) do transistor e o período de chaveamento (T). A tensão imposta à saída deste tipo de conversor é sempre superior à de entrada, através do controle da razão cíclica do chaveamento do transistor.

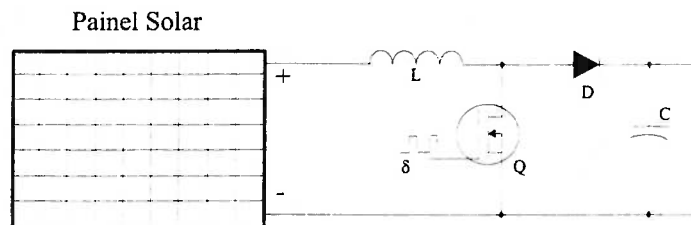


Figura 4.5. Painel Solar ligado a um conversor “boost”

Várias topologias para o controle da razão cíclica são encontradas na literatura, como por exemplo, MIDAYA et al. (1996) propõem um conversor boost com controle analógico, SALAMEH, TAYLOR (1990) propõem a utilização de PWM controlado por um circuito analógico que mede a corrente e tensão na carga e faz o cálculo de potência

instantânea, atualizando a razão cíclica, HILLOOWALA, SHARAF (1992) propõem um controle através de lógica fuzzy, com algoritmos heurísticos.

Neste trabalho a variação da razão cíclica do conversor será controlado por uma malha utilizando algoritmo de controle do tipo “hill-climbing” como proposto por TEULINGS et al. (1993), onde, determina-se o valor da razão cíclica do conversor, calcula-se a potência instantânea, e a seguir define-se se o valor da razão cíclica deve ser aumentada ou diminuída, até que o ponto ótimo seja atingido.

Para obter o modelo do conversor “boost”, partiu-se da análise dos circuitos mostrados na figura 4.6, onde duas situações distintas estão representadas. A figura 4.6(a) representa a situação em que o transistor está na região de saturação, assim, circula pela carga apenas a corrente proveniente do capacitor. A figura 4.6.b representa a situação em que o transistor está na região de corte, portanto, toda a energia armazenada no indutor é transferida para o capacitor e carga.

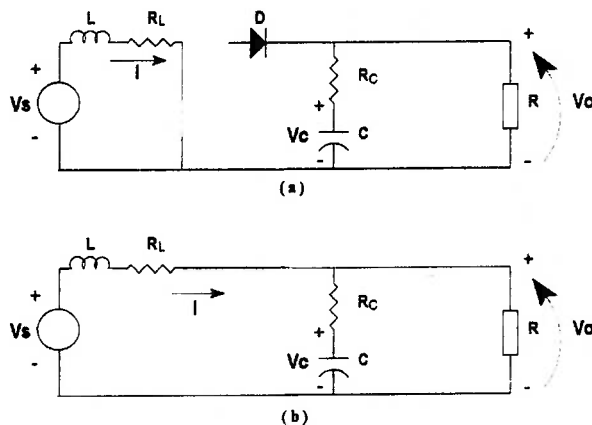


Figura 4.6. Conversor “boost”.

- a) O transistor na região de saturação.
- b) O transistor na região de saturação.

Desta forma, as duas situações representadas acima são complementares, e as equações diferenciais em forma de variáveis de estado que representam estas situações são medianizadas em um período por:

$$\frac{di_L}{dt} = \left[\frac{R_L + (1-\delta)(R // R_C)}{L} \right] i - \left[\frac{(1-\delta)R}{L(R + R_C)} \right] v_C + \frac{V_s}{L} \quad (4.10)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \left[\frac{(1-\delta)R}{(R + R_C)C} \right] i - \frac{v_C}{(R + R_C)C} \quad (4.11)$$

$$V_o = (1-\delta)(R // R_C)I + \left[\frac{R}{R + R_C} \right] v_C \quad (4.12)$$

4.3.1. SIMULAÇÕES DOS MODELOS DO PAINEL SOLAR E CONVERSOR

Através do conjunto de equações diferenciais que determinam o comportamento dinâmico do conversor “boost”, foram feitas simulações através do “software” Simulink/Matlab. O conversor “boost” recebeu como entrada o modelo de um painel solar com 30 células solares. Inicialmente a simulação foi realizada em malha aberta. A figura 4.7 apresenta o diagrama de blocos do modelo em malha aberta implementado no Simulink.

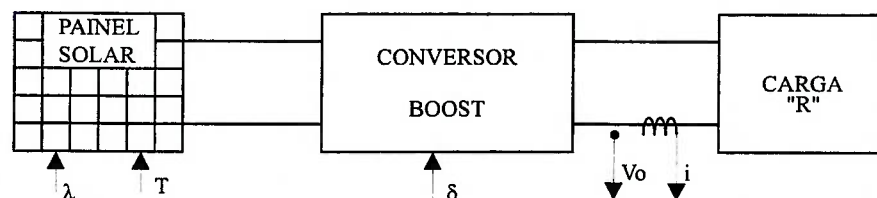


Figura 4.7. Diagrama de blocos do modelo implementado no Simulink.

A figura 4.8 apresenta os resultados de simulações, onde o valor da razão cíclica foi inicialmente imposto e o sistema simulado, posteriormente o valor da razão cíclica foi alterado “manualmente” e novamente o sistema foi simulado por diversas vezes até que o valor da máxima potência fosse alcançado. O resultado dessas interações pode ser observado na figura 4.8, para 3 diferentes valores de carga (25Ω , 50Ω e 100Ω). Observa-se que para uma intensidade solar constante e com variação de carga, há sempre um diferente valor de razão cíclica que maximiza a transferência de potência.

Como o modelo do painel solar, incorpora a variação da potência de saída com a variação da temperatura, foram realizadas simulações com vários valores de temperatura. Os gráficos das figuras 4.9 a 4.17 representam a variação de potência no conversor, rendimento e impedância de saída normalizada, quando ligado a uma carga de 100Ω , para uma temperatura de 0°C , 25°C e 60°C . Para cada nível de temperatura, a intensidade luminosa λ sofre uma variação de 10 mW/cm^2 até o valor máximo de 100 mW/cm^2 .

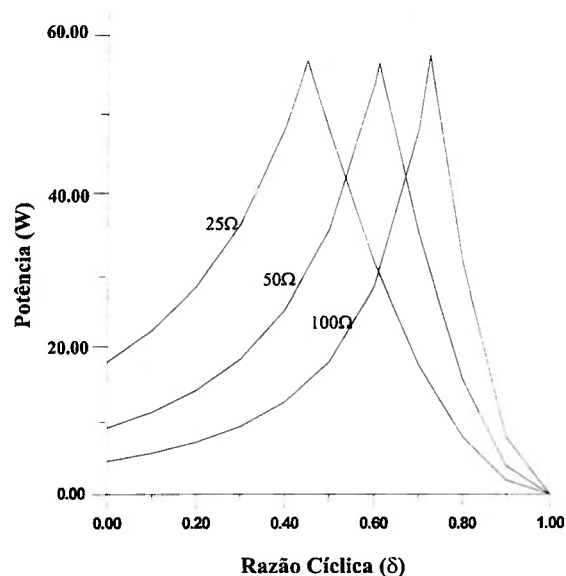


Figura 4.8. Gráfico da potência resultante da simulação em malha aberta, variando-se a carga R , $T=25^\circ\text{C}$ e $\lambda=100\text{ mW/cm}^2$.

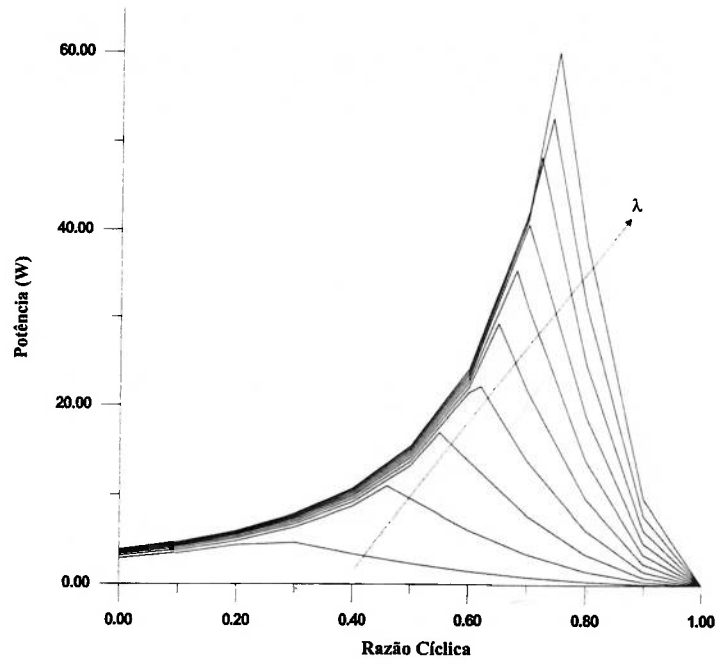


Figura 4.9. Gráfico (Potência x Razão cíclica) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=0^\circ\text{C}$.

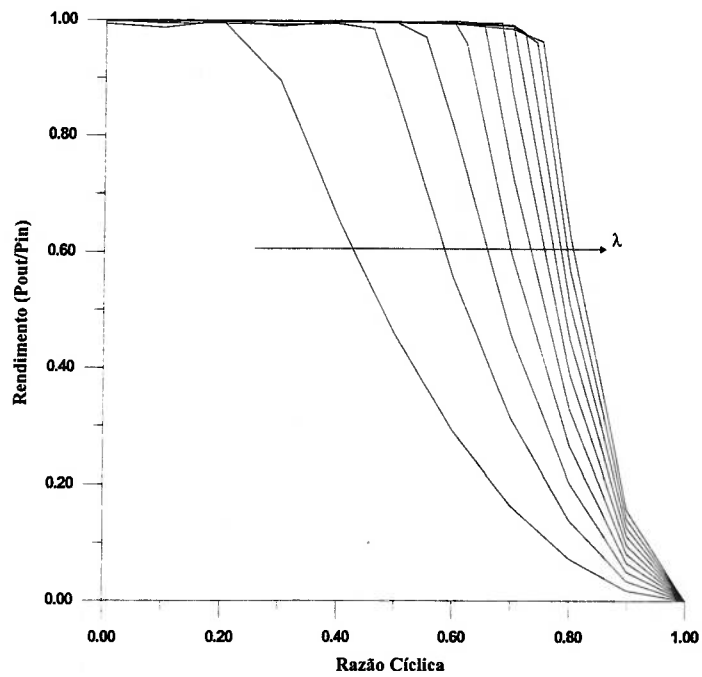


Figura 4.10. Gráfico (Potência Saída x Potência de Entrada) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100 mW/cm^2 e $T=0^\circ\text{C}$.

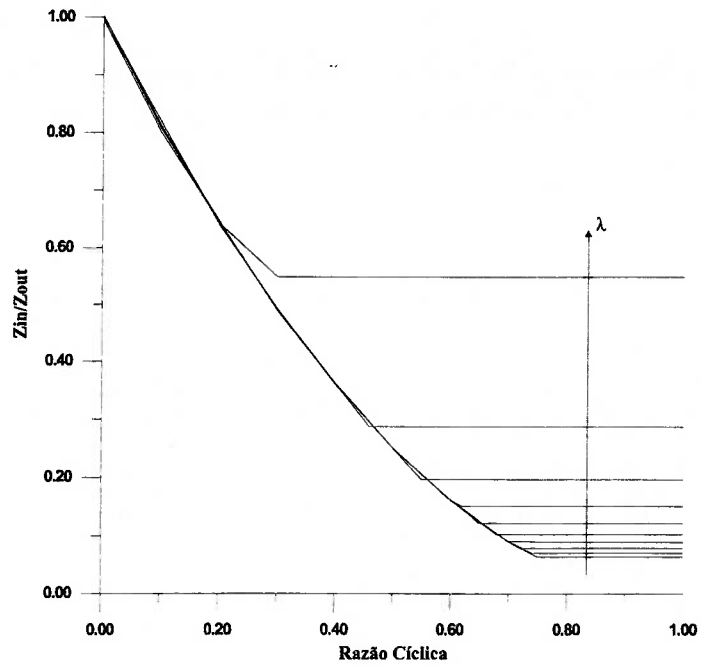


Figura 4.11. Gráfico (Impedância de Saída Normalizada) resultante da Simulação em Malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mw/cm² e T=0 °C.

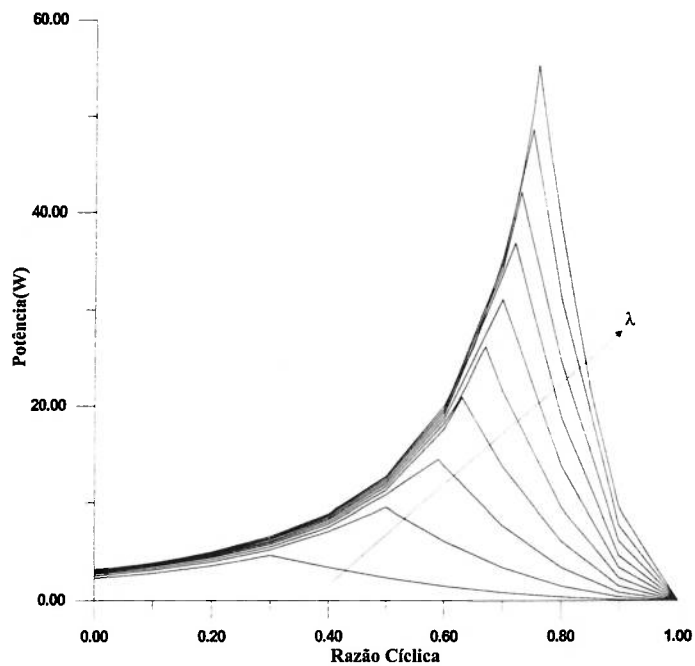


Figura 4.12. Gráfico (Potência x Razão cíclica) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mW/cm² e T=25 °C.

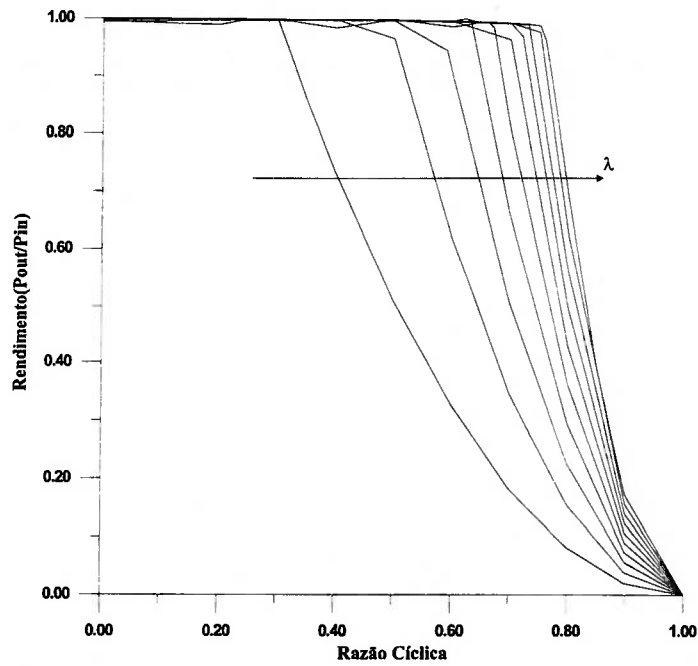


Figura 4.13. Gráfico (Potência Saída x Potência de Entrada) resultante da Simulação em Malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mw/cm² e T=25 °C.

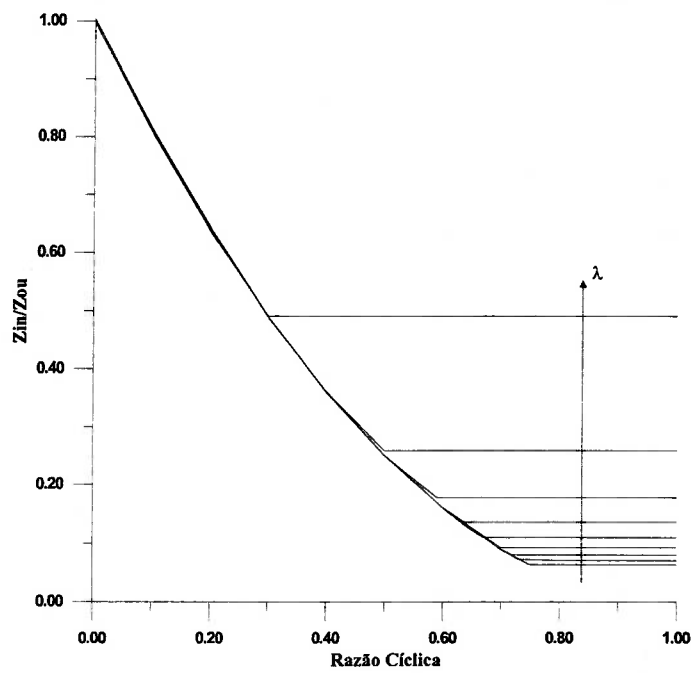


Figura 4.14. Gráfico (Impedância de Saída Normalizada) resultante da Simulação em Malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mw/cm² e T=25 °C.

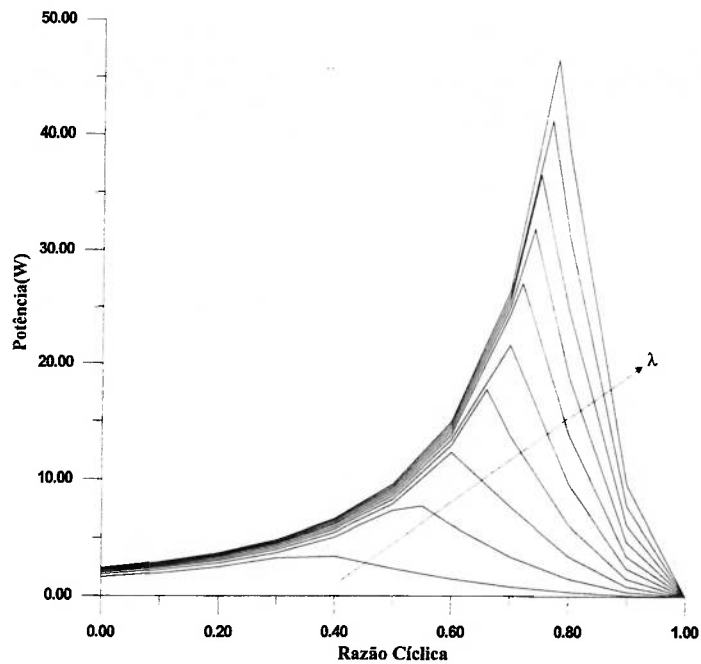


Figura 4.15. Gráfico (Potência x Razão cíclica) resultante da simulação em malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mW/cm² e T=60 °C.

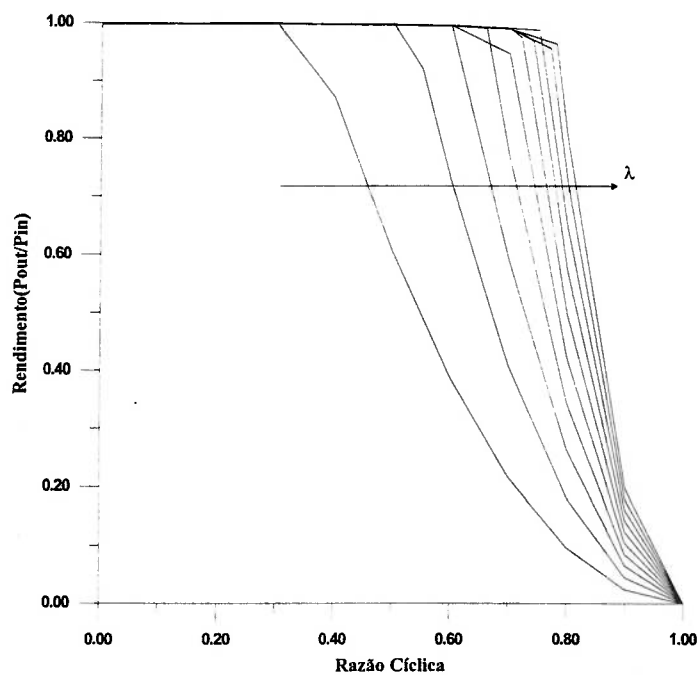


Figura 4.16. Gráfico (Potência Saída x Potência de Entrada) resultante da Simulação em Malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mw/cm² e T=60 °C.

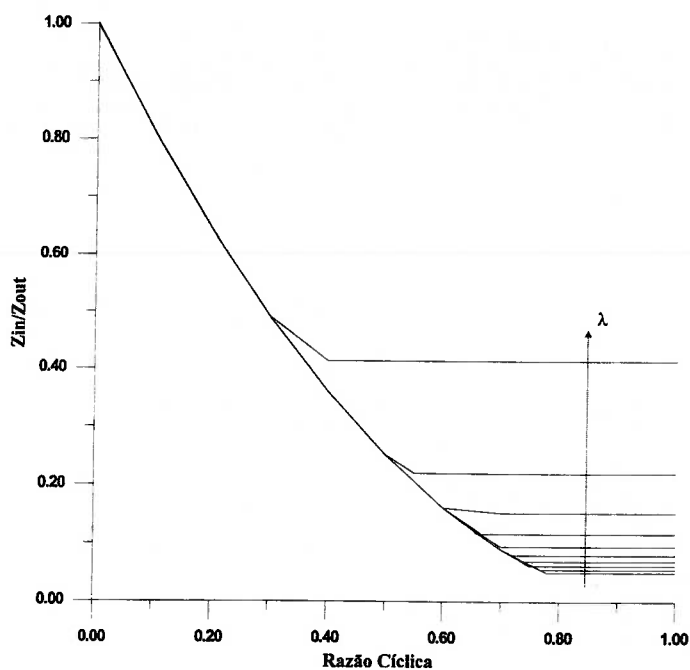


Figura 4.17. Gráfico (Impedância de Saída Normalizada) resultante da Simulação em Malha aberta, variando-se λ de 10 a 100mw/cm² e T=60 °C.

4.3.2. MODELO DA MALHA DE CONTROLE

Com o objetivo de simular o sistema em malha fechada foi desenvolvido um algoritmo de realimentação, permitindo que a razão cíclica de chaveamento do transistor do conversor fosse controlada automaticamente, de forma a atingir o ponto de potência máxima para variação de luminosidade, temperatura ou carga no sistema. A associação do conversor e sistema de controle foi denominado Rastreador de Ponto de Potência Máxima (RPPM).

A figura 4.18 apresenta o diagrama do RRPM.

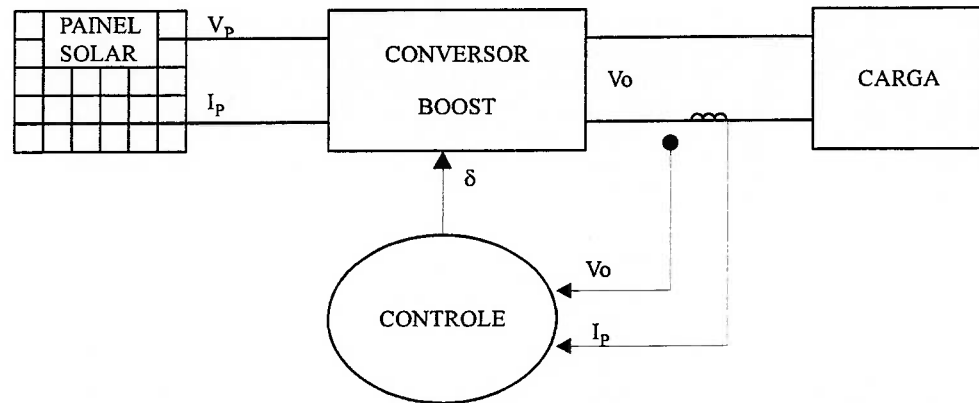


Figura 4.18. Diagrama de blocos do RPPM.

O controle do valor ideal da razão cíclica é realizado através de um sinal de tensão proporcional à corrente do painel, proveniente de monitoração da corrente que flui para a carga. Desta forma, realiza-se o cálculo da potência instantânea, tomando-se a decisão de aumentar ou diminuir o valor da razão cíclica. Este sistema não tem um sinal de referência para realizar o controle, pois o valor da potência máxima está em constante alteração, assim, realizam-se constantemente comparações entre pontos próximos ao ponto de máxima potência, de forma a assegurar o perfeito funcionamento na região correta. A figura 4.19 apresenta o fluxograma do algoritmo de controle utilizado no sistema e incorporado ao modelo do painel solar e conversor.

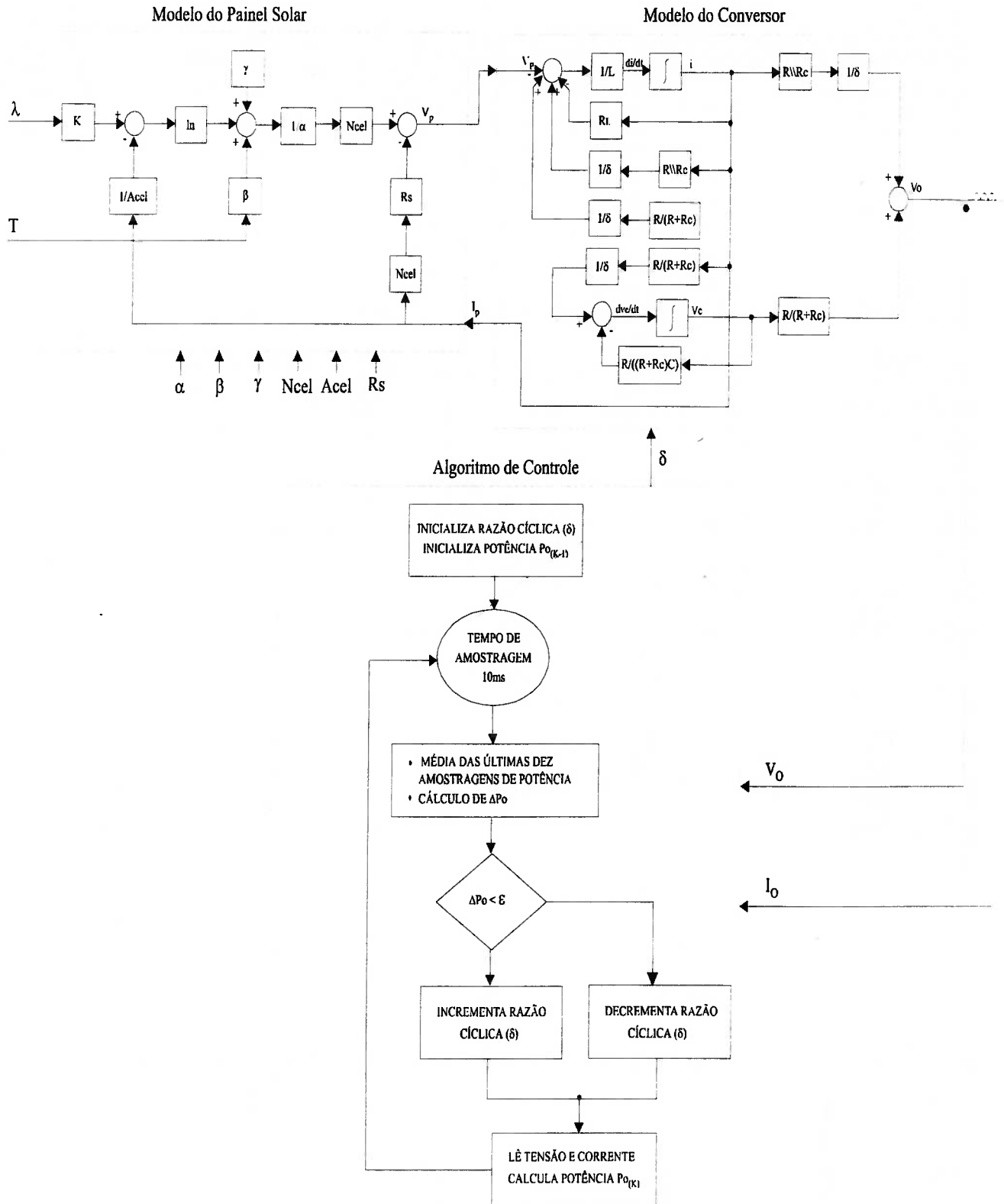


Figura 4.19 Fluxograma completo do sistema de conversão fotovoltaica e do algoritmo de controle.

A figura 4.20 apresenta o resultado de simulação para um degrau de 50 para 100 mW/cm^2 , a uma temperatura e carga constantes de 60°C e 100Ω , respectivamente. Observa-se pela figura 4.20(b) que após o transiente de corrente ocorrido em 4.20(c), a razão cíclica que estava estabilizada em 0.71 subiu até atingir o valor de 0.76, estabelecendo a potência em novo valor, conforme indicado na figura 4.20(a).

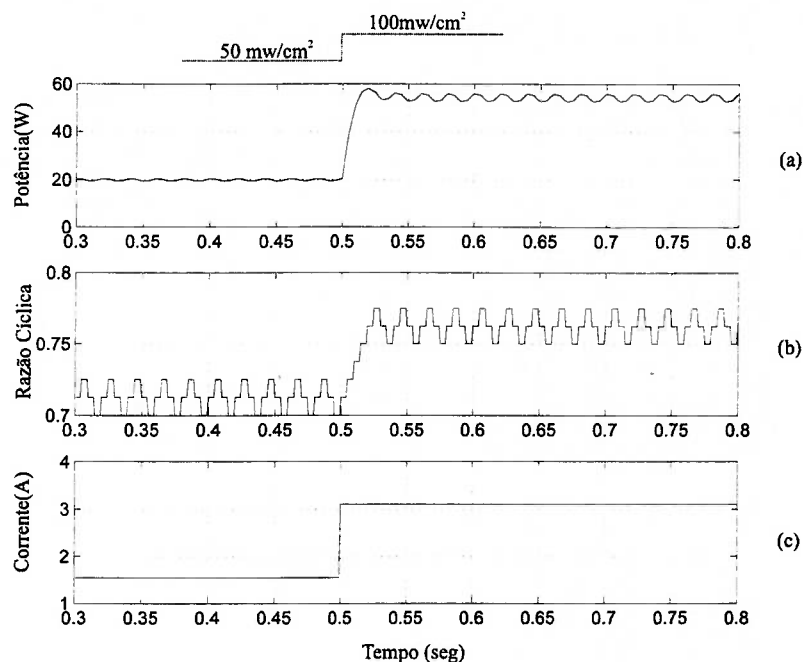


Figura 4.20. Degrâu de Luminosidade λ de 50 para 100 mW/cm^2 , $T=60^\circ\text{C}$ e $R=100\Omega$.

A figura 4.21 apresenta uma situação em que um degrau de temperatura de 25°C para 60°C , com um nível de intensidade luminosa de $100\text{mW}/\text{cm}^2$, foi aplicado ao sistema. Novamente a razão cíclica que estava em 0.765, subiu até 0.785, estabelecendo um novo valor da máxima potência, conforme mostra a figura 4.21(a). Observa-se em 4.21(c) que a corrente permanece constante, pois, conforme discutido anteriormente, a variação de temperatura afeta somente a tensão fornecida pelas células solares.

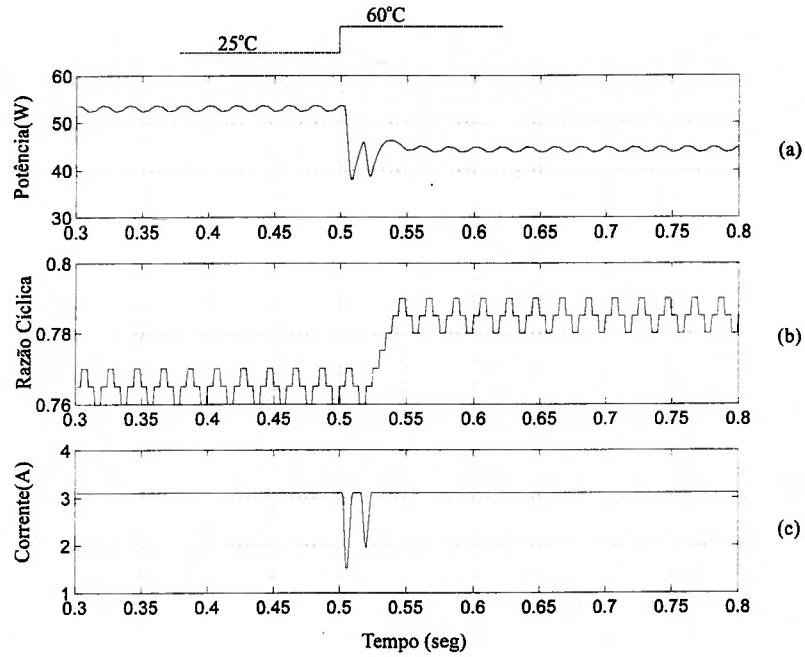


Figura 4.21. Degrau de Temperatura de 25 para 60 °C, $\lambda=100 \text{ mW/cm}^2$ e $R=100\Omega$

As figuras 4.22 e 4.23, apresentam uma situação em que foram aplicados degraus de carga, de 25Ω para 50Ω e de 50Ω para 100Ω , respectivamente, com um nível de intensidade luminosa de 100mW/cm^2 e temperatura de 60°C . Em ambos os casos, a razão cíclica que estava estabilizada em um determinado valor, se alteraram de forma a estabelecer o mesmo nível de potência anterior à alteração da carga, como pode ser observado nas figuras 4.22(a) e 4.23(a).

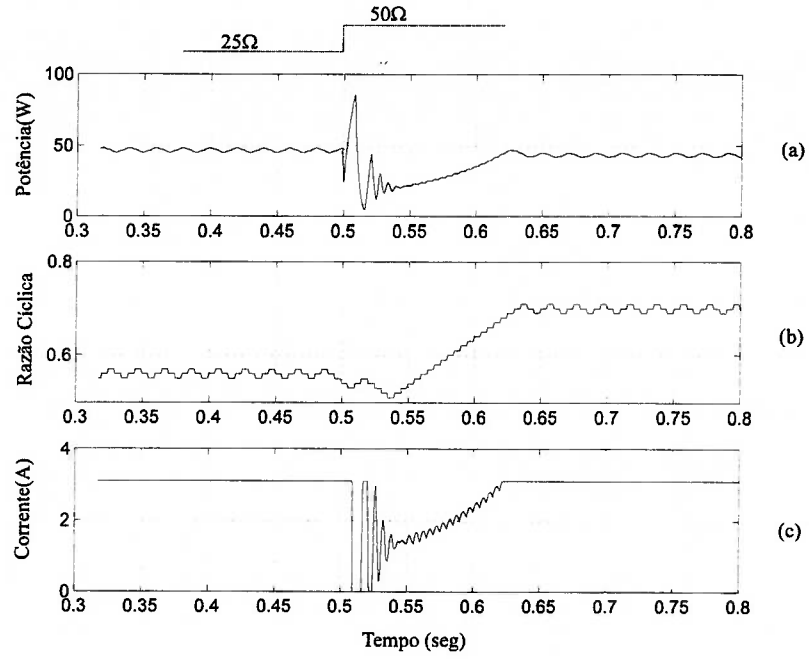


Figura 4.22. Degrau de Carga de 25 para 50Ω, $\lambda=100 \text{ mW/cm}^2$ e $T=60^\circ\text{C}$.

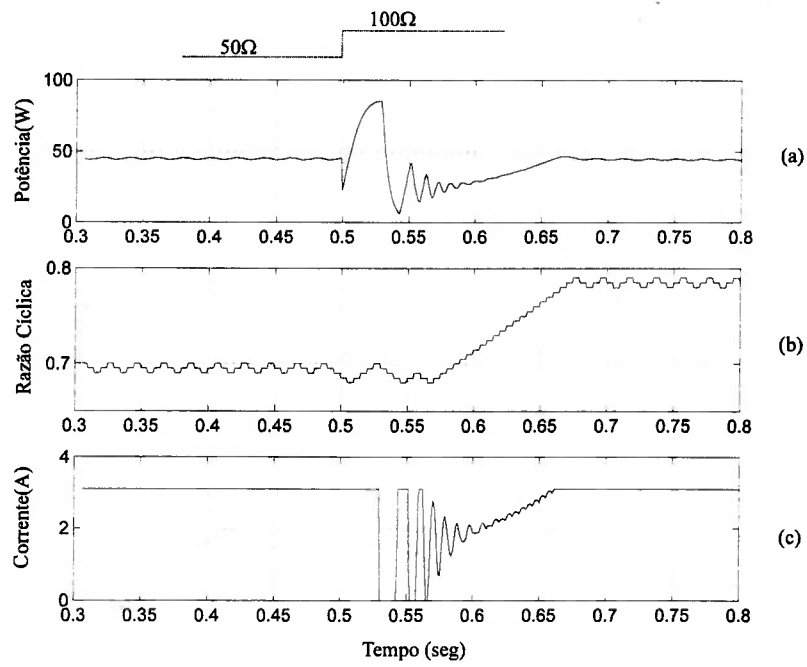


Figura 4.23. Degrau de Carga de 50 para 100Ω, $\lambda=100 \text{ mW/cm}^2$ e $T=60^\circ\text{C}$.

Esses estudos e simulações permitiram o desenvolvimento de um conversor chaveado, cujo controle da razão cíclica, é realizado por um microprocessador. O algoritmo de controle é idêntico ao proposto no fluxograma da figura 4.19. O cálculo da potência e valor ótimo da razão cíclica, são baseados na monitoração da corrente que flui através de um resistor “shunt”, ligado em série com a saída do painel solar. Os resultados experimentais são apresentados no capítulo 7.

O apêndice “A” apresenta a modelagem dos sistemas implementados no Simulink.

CAPÍTULO 5

MODELAGEM DO ELEVADOR DE TENSÃO REGENERATIVO

5.1. FLUXO ENERGÉTICO

Como mencionado anteriormente, o motor utilizado no veículo Poli-Solar é uma máquina Brushless de corrente contínua trifásica, com tensão nominal de 210V. Como o conjunto de baterias fornece uma tensão de 120V para o elo cc, o motor somente atingirá sua velocidade máxima quando o elo cc atingir a sua tensão nominal. Neste sentido, foi necessário elevar a tensão para 210V. A primeira opção foi utilizar as vinte baterias do veículo, ligando-as serialmente, porém caso alguma bateria se danificasse ou se descarregasse completamente, todo o sistema de acionamento e controle estaria comprometido, tornando esta solução crítica quanto à robustez do sistema. A segunda opção seria adicionar mais baterias ao conjunto, completando a valor da tensão, porém o peso adicionado ao veículo comprometeria seu desempenho. Outra possibilidade, efetivamente implementada, foi a de utilizar um circuito eletrônico elevador de tensão, mantendo a mesma potência fornecida pelo conjunto de baterias. Uma análise comparativa entre as três opções, mostrou ser a escolha de uma elevador de tensão, a mais adequada, devido a relação peso/volume ocupado ser muito menor. Neste sentido, um circuito elevador de tensão tipo 'boost', semelhante ao utilizado no circuito RPPM, foi considerado como a solução ideal para esta aplicação. Além das características deste

tipo de conversor, mencionadas anteriormente, há a necessidade de que seja regenerativo, assim, a corrente pode fluir normalmente da bateria para o motor, ou do motor para a bateria. Esta característica é de vital importância para o sistema de acionamento, pois o fluxo energético de um veículo elétrico exige tal comportamento devido à frenagem.

O fluxo da potência elétrica de um veículo solar depende da disponibilidade de energia do painel e da demanda do motor. Em caso da demanda do motor ser superior à energia fornecida pelo painel solar, a bateria também pode suprir o que for necessário. Caso o veículo solar sofra uma frenagem ou desça alguma ladeira, a máquina Brushless cc, comporta-se como um gerador, elevando a tensão do elo cc do sistema de acionamento. Assim, esta energia pode ser dissipada através de resistores ou ser aproveitada, através da inversão do fluxo de corrente. A figura 5.1. apresenta o fluxo energético do Poli-Solar.

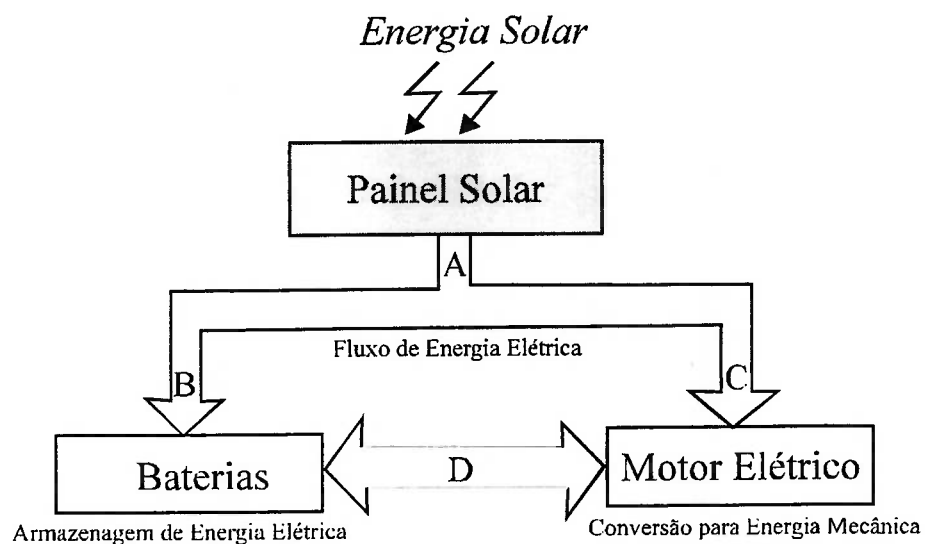


Figura 5.1. Fluxo de energia elétrica em veículo solar.

O fluxo principal de energia “A” depende exclusivamente dos fatores de conversão fotovoltaica. Os fluxos “B” e “C” dependem da demanda do motor e do estado de carga das baterias. O fluxo “D” depende da demanda do motor, caso o fluxo “C” não consiga suprir, a bateria fornecerá o complemento, porém, em caso de regeneração a energia gerada pelo motor será entregue para armazenagem nas baterias.

5.2. MODELAGEM DO ELEVADOR DE TENSÃO REGENERATIVO

O circuito elevador de tensão proposto é similar ao conversor “boost” empregado no sistema fotovoltaico, porém, neste caso a razão cíclica não se altera, determinando que a tensão de saída fique estabilizada. A figura 5.2 apresenta o circuito elevador de tensão. Observa-se o circuito “boost”, onde o bloco Controle de Chaveamento gera o sinal de excitação dos transistores T_1 e T_2 , sendo alimentado pelo conjunto de baterias, e sua saída é ligada ao inversor do sistema de acionamento.

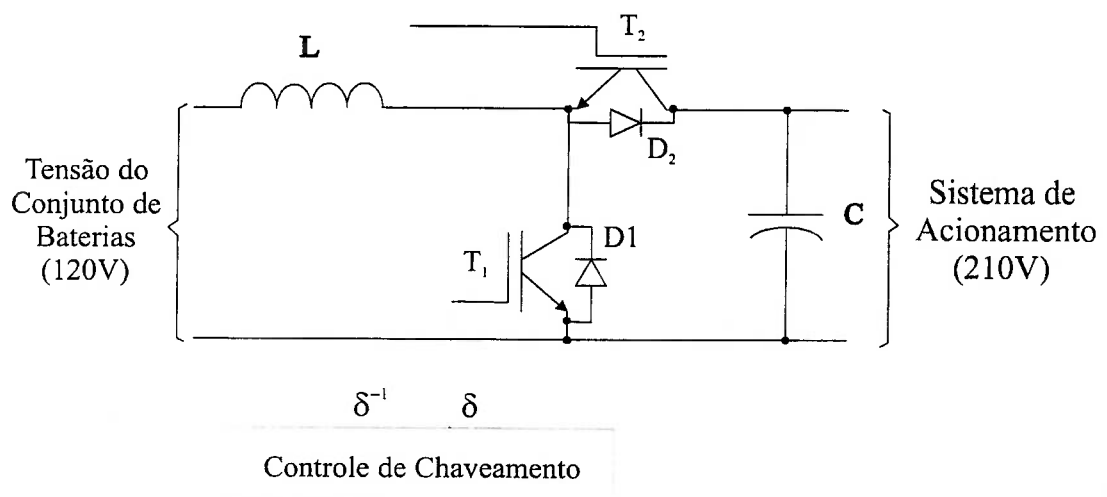


Figura 5.2. Circuito elevador de tensão regenerativo

Diferentemente dos conversor “boost” tradicionais, o circuito elevador de tensão regenerativo possui um transistor adicional, ligado em paralelo ao diodo “D₂”. O bloco denominado Controle de Chaveamento, controla o acionamento dos dois transistores, impondo a condição de fluxo da corrente. O transistor “T₂” é excitado por um sinal complementar (δ^{-1}) ao do transistor “T₁”, o que significa que em operação normal, onde o fluxo ocorre da bateria para a máquina, sua excitação não causa nenhum efeito, porém quando a tensão do elo cc torna-se superior ao valor normal, a corrente flui da máquina para a bateria, causando regeneração.

Os circuitos equivalentes do elevador de tensão regenerativo são idênticos aos apresentados nas figuras 4.6(a) e 4.6(b) do capítulo 4. As correspondentes equações diferenciais na forma de espaço de estado são, agora, desenvolvidas com razão cíclica fixa. As equações diferenciais do circuito equivalente da figura 4.6(a) estão descritas abaixo:

$$\frac{di_L}{dt} = -\left[\frac{R_L}{L}\right]i + \frac{V_s}{L} \quad (5.1)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{(R + R_C)C} \quad (5.2)$$

$$V_o = \left[\frac{R}{R + R_C}\right]V_C \quad (5.3)$$

As equações correspondentes ao circuito apresentado na figura 4.6(b) são:

$$\frac{di_L}{dt} = -\left[\frac{R_L + (R // R_C)}{L}\right]i - \left[\frac{R}{L(R + R_C)}\right]v + \frac{v_s}{L} \quad (5.4)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \left[\frac{R}{(R + R_C)C}\right]i - \frac{v_C}{(R + R_C)C} \quad (5.5)$$

$$V_o = (R // R_C)i + \left[\frac{R}{R + R_C}\right]v_C \quad (5.6)$$

5.2.1. SIMULAÇÕES DO MODELO DO ELEVADOR DE TENSÃO

Utilizando o conjunto de equações diferenciais que determinam o comportamento dinâmico do elevador de tensão regenerativo, foi implementado o modelo e realizado simulações com o software Simulink/Matlab. O modelo utilizou como entrada uma fonte de tensão constante, e sua saída alimentou uma carga resistiva.

A figura 5.3. apresenta o diagrama de blocos do modelo implementado no Simulink.

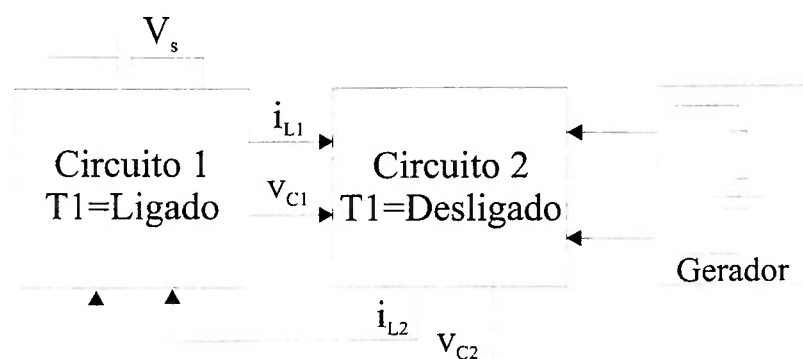


Figura 5.3. Diagrama de blocos implementado no Simulink

O bloco Controle de Chaveamento é o responsável por gerar o sinal de chaveamento dos transistores com uma frequência de 10kHz . A razão cíclica é ajustável, de forma a se obter o valor de tensão na saída no nível desejado. Os blocos Circuito 1 e Circuito 2, representam as equações diferenciais dos dois circuitos equivalentes, os sinais “ i_{L1} ”, “ i_{L2} ”, “ v_{c1} ” e “ v_{c2} ” representam as condições iniciais dos integradores para a corrente no indutor e tensão no capacitor. O Bloco Gerador é constituído por uma fonte cc, representando a máquina em situação regenerativa.

A figura 5.4 apresenta o resultado de simulação do modelo, quando alimentando uma carga de 5Ω , onde a tensão de saída é elevada para 210V e a corrente é 43A. O valor dos componentes utilizados na simulação foram os mesmos da implementação final: $L=3\text{ mH}$, $C=3500\mu\text{F}$, $R=5\Omega$, $V_s=120\text{V}$, $R_c=0.034\Omega$, $R_L=0.27\Omega$, e o valor de razão cíclica igual a 0.565.

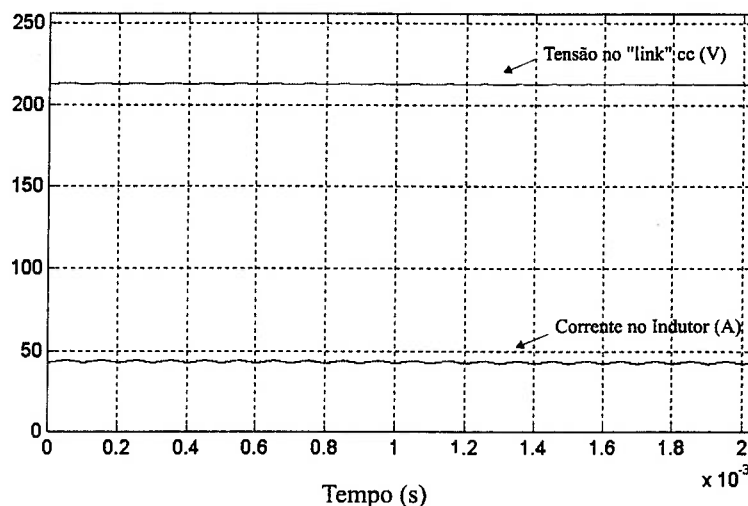


Figura 5.4. Elevador de tensão alimentado uma carga de 5Ω .

A figura 5.5 apresenta a forma de onda da corrente no indutor, mediante o chaveamento do transistor T_1 , onde, a tensão em T_1 foi reduzida por um fator de 10 para

ser plotada no mesmo gráfico. Observa-se que existe uma variação de corrente “ Δv ” de aproximadamente 3A, ocasionada pelo dimensionamento do indutor utilizado.

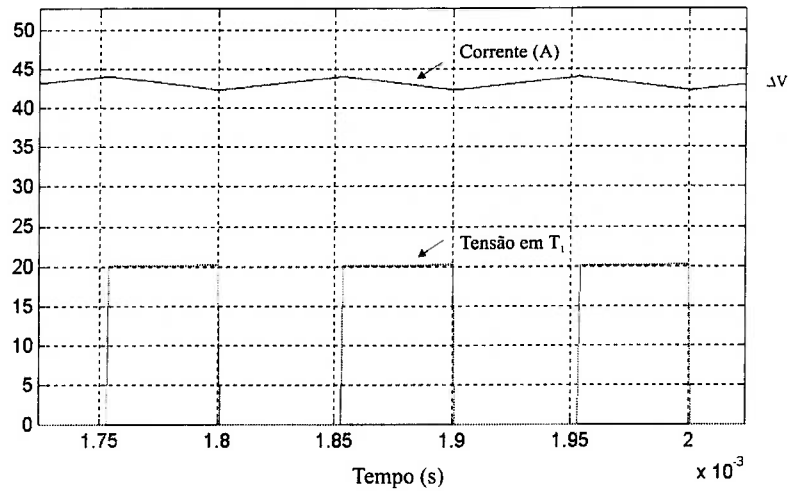


Figura 5.5. Corrente no indutor e chaveamento do transistor T1.

A figura 5.6 apresenta a resposta do sistema para um degrau de carga de 5Ω para 10Ω , com a tensão de entrada V_s constante.

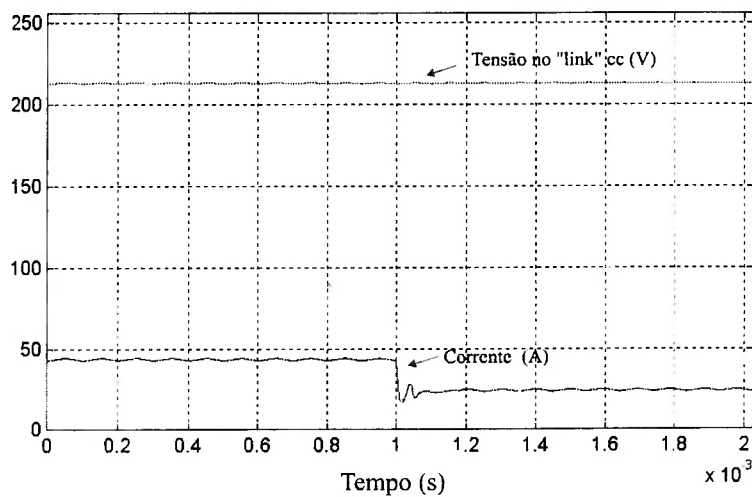


Figura 5.6. Degrau de carga de 5Ω para 10Ω

A figura 5.7 apresenta o sistema operando em modo regenerativo. O sistema recebeu uma excitação externa através do bloco Gerador, com valor de tensão de 250V, portanto, superior aos 210V imposto à saída, o que proporcionou a inversão do fluxo de corrente, tornando-a negativa.

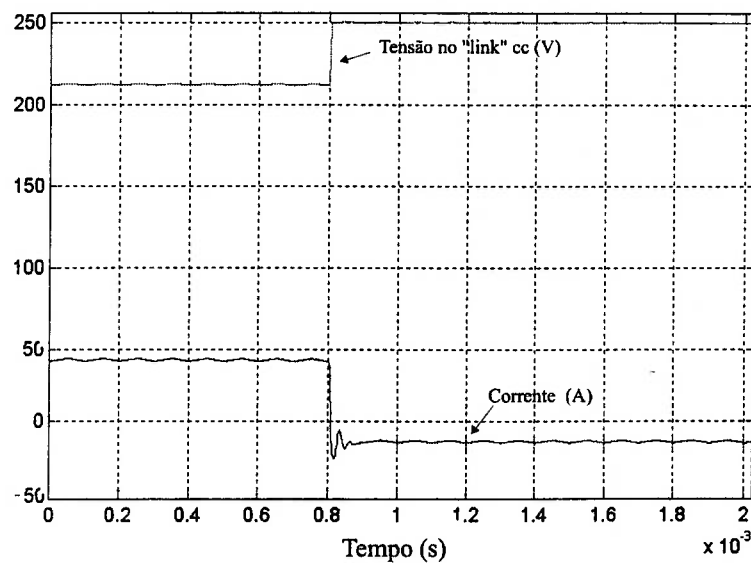


Figura 5.7. Sistema operando em modo regenerativo.

O estudo de simulação permitiu a compreensão do comportamento dinâmico do conversor “boost”, e do sistema de controle que realiza a regeneração, além de auxiliar no dimensionamento dos componentes eletrônicos utilizados na implementação apresentada no capítulo 7.

O apêndice “C” apresenta a implementação completa do modelo realizado no Simulink/Matlab.

CAPÍTULO 6

MODELAGEM DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

6.1. MOTOR BRUSLHES E SISTEMA DE ACIONAMENTO

Segundo HENDERSHOT, MILLER (1994), os motores Brushless, como o próprio nome indica, pertencem a uma categoria que não possuem escovas, anéis ou comutadores mecânicos. Atualmente os motores Brushless estão se tornando muito competitivos em aplicações de servomecanismos, devido ao desenvolvimento tecnológico dos dispositivos de acionamento, relativa facilidade de controle e possibilidade de controle de velocidade e torque em larga faixa de operação, o que torna desnecessário o uso de transmissões mecânicas, como descrito por SAKMANN (1987). Segundo EVANS, BROWN (1990), seu uso é crescente para aplicações em potências relativamente baixas, como periféricos de computadores e aplicações automotivas. Neste sentido, o domínio da técnica de modelagem e simulação torna-se muito importante. A técnica mais empregada na modelagem de motores Brushless é feito com o inversor acoplado, utilizando a seqüência de chaveamento dos transistores, onde, segundo BERENDSEN et al. (1993), as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- (1) Balanceamento das fases do conversor ou máquina;
- (2) Linearidade dos dispositivos do circuito;
- (3) Simetria das fases ou sequenciamento do inversor;
- (4) Regularidade da forma de onda das tensões induzidas;
- (5) Estabilidade da tensão de alimentação.

Esta técnica é apresentada por SAKMANN (1987), onde um hardware para controle e acionamento utilizando um microprocessador foi implementado, cujo controle possui a seqüência de chaveamento armazenado em uma memória EPROM e monitora informações provenientes dos sensores de efeito Hall do motor. EASTHAM et al. (1994) apresenta um sistema que utiliza um DSP (“Digital Signal Processing”) para controle do motor Brushless. A técnica de simulação para sistemas de acionamento de motor Brushless de corrente contínua é proposto por EVANS, BROWN (1990), onde a operação do controlador do inversor é incorporado ao circuito equivalente do modelo através de matrizes, que descrevem a condução de cada dispositivo do inversor. LOW et al. (1990), BERENDSEN et al. (1993) e PILLAY, KRISHNAN (1988), apresentam a modelagem do motor e uma estratégia de controle de torque instantâneo. Já os efeitos dos parâmetros do motor Brushless são abordados por WALLACE, SPÉE (1990).

A modelagem matemática, empregada neste trabalho, possui como princípio utilizar-se da seqüência de acionamento dos transistores, levando-se em consideração os períodos de condução de cada transistor e a corrente de “free-wheeling”, que ocorre devido ao chaveamento dos enrolamentos. Desta forma, existe um circuito equivalente para cada transitório e período de condução dos transistores.

6.1.1. REVISÃO SOBRE MOTORES BRUSHLESS

O motor Brushless de corrente contínua está representado na figura 6.1. Dois ímãs permanentes estão posicionados no corpo do rotor, o que representa dizer que o motor é de 4 pólos. O estator é laminado de forma que os enrolamentos estejam distribuídos no estator. Este tipo de configuração evita a necessidade de escovas ou comutadores mecânicos. Como o rotor não possui enrolamentos, o seu tamanho é muito menor que o do motor de corrente contínua com escovas, o que implica em uma redução da inércia do rotor facilitando a refrigeração. O estator é similar à de um motor de indução.

A topologia do motor Brushless cc corresponde ao inverso da topologia de um motor cc com comutadores, onde os ímãs ficam parados e os enrolamentos é que giram. Em ambos, as correntes nos condutores devem reverter de polaridade toda vez que passam por um polo do ímã, para que o torque seja unidirecional.

No controle dos motores com comutadores, a inversão de polaridade é realizada por comutador e escova. Assim, o comutador é fixo ao rotor e os chaveamentos são automaticamente sincronizados, alternando-se com as polaridades do campo magnético atravessado pelos condutores, que estão passando pelo pólo.

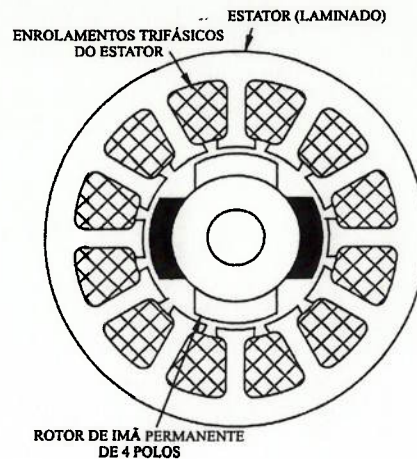


Figura 6.1. Seção transversal de um motor Brushless de corrente contínua.

No motor Brushless, a inversão de polaridade é realizada por transistores de potência, que devem ser chaveados em sincronismo com a posição do rotor. O processo de comutação é similar nas duas máquinas, as equações, o desempenho resultante e características velocidade e torque são idênticos.

Quando a corrente chaveada está com a polaridade em sincronismo com a passagem dos pólos magnéticos norte e sul, diz-se que, o motor está sendo operado com excitação em onda-quadrada. A forma de onda do fluxo magnético neste caso é normalmente semelhante a uma onda-trapezoidal.

6.1.2. COMUTAÇÃO DO MOTOR BRUSHLESS

O processo de comutação é fundamental para o acionamento e controle de um motor Brushless cc. A figura 6.2 apresenta o rotor de um motor cc com comutador, girando em

um campo magnético fixo, o qual é produzido por um ímã permanente de dois pólos, tendo portando, somente um único norte e sul para cada revolução completada. O ângulo θ , mostrado na figura, é a distância do eixo da bobina ao eixo de referência.

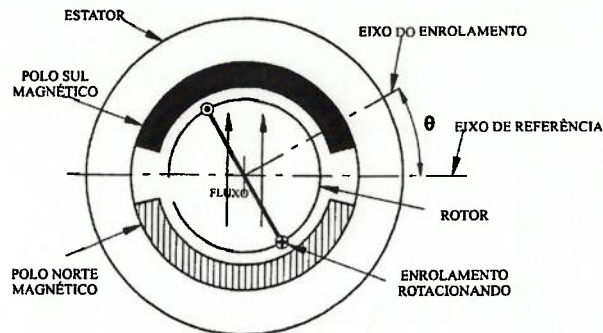


Figura 6.2. Seção transversal de um motor cc com comutador.

Para saber a forma de onda da força contra-eletromotriz, mostrada na figura 6.3, quando o rotor está girando, é necessário, primeiramente, achar a forma de onda do fluxo enlaçado ψ , que é o produto do número de espiras e do fluxo ϕ que passa pelas bobinas.

Quando θ é igual a zero, o fluxo enlaçado é nulo, similarmente quando $\theta = 180^\circ$, se repetindo quando completar uma volta. Entre 0 e 180° , o fluxo cresce até um valor máximo, que corresponde a 90° , quando o fluxo passa transversalmente pelos condutores.

Assim, pode-se determinar a forma de onda da força contra-eletromotriz através da lei de Faraday, por ser um fator proporcional à variação do fluxo enlaçado. Matematicamente pode-se escrever:

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \quad (6.1)$$

Onde, ω_m é a velocidade angular.

Como N é a velocidade em rpm, então:

$$\omega_m = \frac{2\pi N}{60} (\text{rad} / \text{seg}) \quad (6.2)$$

A taxa de variação do fluxo enlaçado com a posição do rotor, $\partial\psi/\partial\theta$, é obtido através da figura 6.3.

O comutador fornece a corrente i_a para a bobina com a mesma polaridade da força contra-eletromotriz (e_a), assim a potência elétrica fornecida é:

$$P_e = e_a i_a \quad (6.3)$$

Para uma velocidade constante, e desprezando-se as perdas, a potência elétrica é completamente convertida em potência mecânica.

$$P_m = T_a \omega_m \quad (6.4)$$

Onde, T_a é o torque produzido pelo enrolamento L_A .

O torque unidirecional é obtido como resultado da reversão de polaridade da corrente em sincronismo com a força contra-eletromotriz. Portanto, o torque produzido por apenas um enrolamento não é constante. Existem períodos de torque nulo, que ocorrem devido ao espaço entre norte e sul do ímã.

Com o motor na configuração estrela (Y), um dos lados dos terminais dos enrolamentos estão curto-circuitados entre-si e seus outros terminais estão conectados a comutadores defasados de 120° . O torque produzido nos enrolamentos L_B e L_C são idênticos

ao produzido no enrolamento L_A , mas deslocados de 120° e 240° , respectivamente. Portanto, o torque total (T), como mostrado na figura 6.3, é a soma dos torque dos três enrolamentos, assim:

$$T = T_a + T_b + T_c \quad (6.5)$$

O comportamento de um motor cc com comutador é idêntico ao de um motor Brushless cc controlado por onda quadrada. No motor Brushless cc, o circuito inversor com transistor, apresentado na figura 6.4, é equivalente ao comutador e escova do motor com comutador.

O torque constante para utilização em servo-sistemas é muito importante, pois normalmente necessita-se de controle de velocidade e torque. Em máquinas ferramentas, por exemplo, o acabamento de uma superfície pode ser afetado devido à variação de torque.

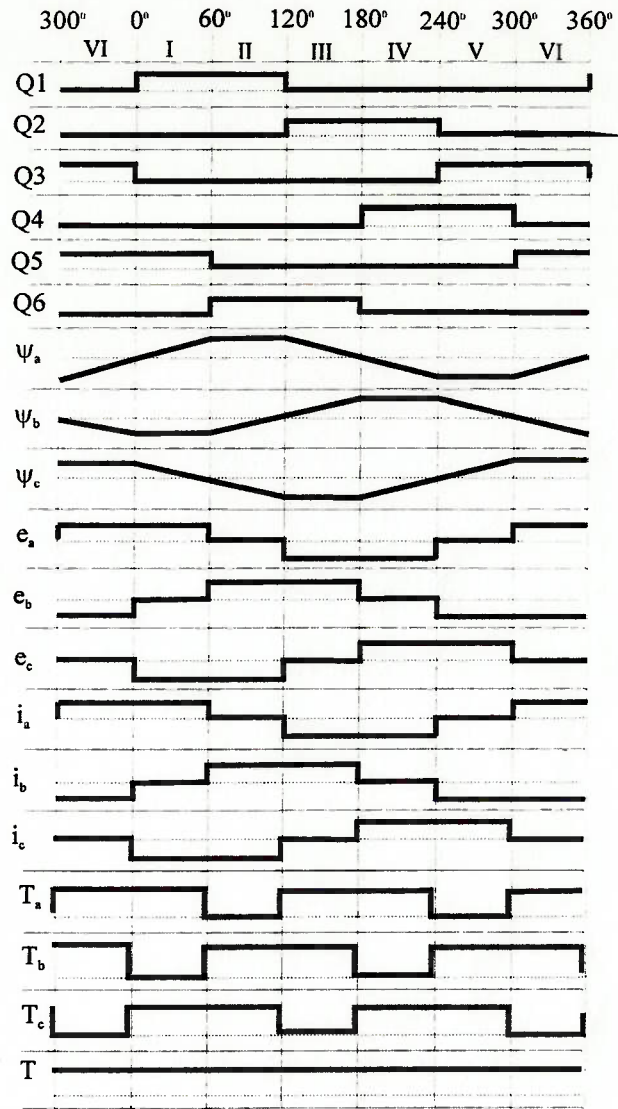


Figura 6.3. Formas de onda da seqüência de chaveamento dos transistores da ponte trifásica, fluxo, força contra-eletromotriz, correntes e torques.

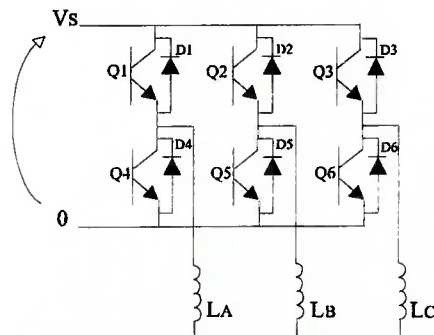


Figura 6.4. Ponte trifásica de um inversor típico para acionamento de motor Brushless cc.

6.2. MODELAGEM DO MOTOR BRUSHLESS E SISTEMA DE ACIONAMENTO

A modelagem matemática empregada neste trabalho, utiliza a seqüência de acionamento dos transistores, conforme mostrado na figura 6.5, que apresenta os períodos de condução de I a VI, correspondentes a 60° elétricos. Em cada período há uma corrente de “free-wheeling” circulando, além da corrente imposta.

Assim, há um circuito equivalente para cada período de condução dos transistores. A tabela da figura 6.5 é baseada na seqüência de acionamento dos transistores da figura 6.4, contendo os transistores e os diodos que estão ligados em cada período e transitório, bem como a corrente que está circulando naquele momento. Para cada circuito equivalente há uma equação diferencial, que representa as correntes “ i_a ”, “ i_b ”, e “ i_c ” dos enrolamentos “A”, “B”, e “C”.

0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
	D2		D3		D1	
Q1		Q2		Q3		
Q5	Q6		Q4		Q5	
D6		D4		D5		
Periodo I	Periodo II	Periodo III	Periodo IV	Periodo V	Periodo VI	
Q1 e Q5 - LIGADOS	Q1 e Q6 - LIGADOS	Q2 e Q6 - LIGADOS	Q2 e Q4 - LIGADOS	Q3 e Q4 - LIGADOS	Q3 e Q5 - LIGADOS	
Transitório	Transitório	Transitório	Transitório	Transitório	Transitório	
L_C DESCAREGA-SE POR Q5 E D6 $i_{TI} = i_C$	L_B DESCAREGA-SE POR Q1 E D2 $i_{TI} = i_B$	L_A DESCAREGA-SE POR Q6 E D4 $i_{TI} = i_A$	L_C DESCAREGA-SE POR Q2 E D3 $i_{TI} = i_C$	L_B DESCAREGA-SE POR Q4 E D5 $i_{TI} = i_B$	L_A DESCAREGA-SE POR Q3 E D1 $i_{TI} = i_A$	

Figura 6.5. Tabela dos chaveamentos dos transistores nos períodos e transitórios.

6.2.1. MODELAGEM DOS CIRCUITOS EQUIVALENTES

O desenvolvimento das equações diferenciais foi realizado para os períodos de I a VI, e para os transitórios entre estes períodos. As equações são apresentadas para o período I e do transitório entre o período I e o período II. As demais equações foram desenvolvidas utilizando a mesma metodologia.

A seguinte notação foi utilizada nas equações diferenciais:

V = tensão imposta pelo elo cc (V);

L = indutância de cada enrolamento do estator (mH);

R_L = resistência de cada enrolamento do estator (Ω);

V_D = queda de tensão no diodo D (V);

V_Q = queda de tensão no transistor Q (V);

i_a = corrente no enrolamento L_A (A);

i_b = corrente no enrolamento L_B (A);

i_c = corrente no enrolamento L_C (A);

e_a = força contra-eletromotriz imposta no enrolamento L_A (V);

e_b = força contra-eletromotriz imposta no enrolamento L_B (V);

e_c = força contra-eletromotriz imposta no enrolamento L_C (V).

Para o período I, que corresponde de 0 a 60°, e estando a máquina em regime permanente, observa-se pela figura 6.5, que os transistores Q_1 e Q_5 estão conduzindo simultaneamente, assim o elo cc impõe uma corrente, denominada iR_1 , que circula pelos enrolamentos L_A e L_B . A figura 6.6 apresenta o circuito equivalente para este período.

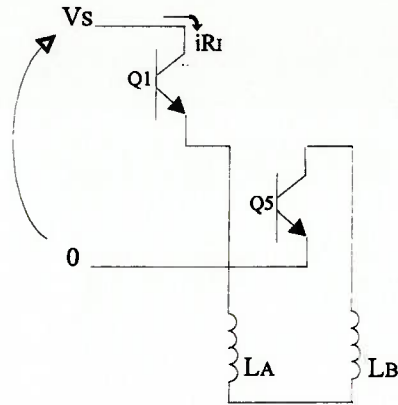


Figura 6.6. Circuito equivalente da condução dos transistores do período I

As equações que representam o comportamento dinâmico deste circuito estão apresentadas em (6.6) e (6.7).

$$\frac{d i_{RI}}{dt} = \frac{1}{2L} (+V - 2V_Q - 2R_L i_{RI} - e_a + e_b) \quad (6.6)$$

$$i_{RI} = i_a = -i_b \quad (6.7)$$

A figura 6.5 também mostra a mudança do período I para o período II, que é realizada desligando-se o transistor Q_5 e ligando-se o transistor Q_6 . Como a corrente i_{RI} que estava circulando pelas bobinas L_A e L_B não pára instantaneamente, devido à suas indutâncias, haverá uma corrente de “free-wheeling” circulando através do diodo D_2 e transistor Q_1 , até que a energia dos indutores seja descarregada totalmente. A figura 6.7 apresenta o circuito equivalente para este transitório.

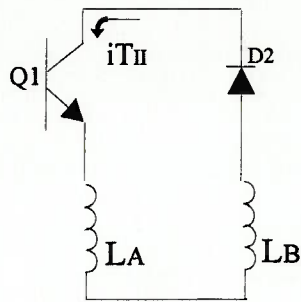


Figura 6.7. Circuito equivalente do transitório do período I para o período II.

As equações que determinam a corrente i_{TII} durante o transitório estão apresentadas em (6.8) e (6.9)

$$\frac{di_{TII}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{TII} - e_a + e_b) \quad (6.8)$$

$$i_{TII} = i_a = -i_b \quad (6.9)$$

Assim, utilizando a mesma metodologia de análise dos outros circuitos equivalentes, obtêm-se o conjunto das equações diferenciais que representa o comportamento dinâmico da associação do inversor trifásico com o motor Brushless trifásico de corrente contínua, conforme a tabela 1.

Período I (0° a 60°)	$\frac{di_{RI}}{dt} = \frac{1}{2L} (+V - 2V_Q - 2R_L i_{RI} - e_a + e_b)$
	$i_{RI} = i_a = -i_b$
Transitório I→II	$\frac{di_{TII}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{TII} - e_a + e_b)$
	$i_{TII} = i_a = -i_b$
Período II (60° a 120°)	$\frac{di_{TII}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{TII} - e_a + e_c)$
	$i_{TII} = i_a = -i_c$
Transitório II→III	$\frac{di_{TII}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{TII} - e_a + e_c)$
	$i_{TII} = i_a = -i_c$
Período III (120° a 180°)	$\frac{di_{RIII}}{dt} = \frac{1}{2L} (+V - 2V_Q - 2R_Q i_{RIII} - e_b + e_c)$
	$i_{RIII} = i_b = -i_c$
Transitório III→IV	$\frac{di_{TIII}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{TIII} - e_b + e_c)$
	$i_{TIII} = i_b = -i_c$
Período IV (180° a 240°)	$\frac{di_{RIV}}{dt} = \frac{1}{2L} (+V - 2V_Q - 2R_Q i_{RIV} - e_b + e_a)$
	$i_{RIV} = i_b = -i_a$
Transitório IV→V	$\frac{di_{TIV}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{TIV} - e_b + e_c)$
	$i_{TIV} = i_b = -i_a$
Período V (240° a 300°)	$\frac{di_{RV}}{dt} = \frac{1}{2L} (+V - 2V_Q - 2R_Q i_{RV} - e_c + e_a)$
	$i_{RV} = i_c = -i_a$
Transitório V→VI	$\frac{di_V}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_V - e_c + e_a)$
	$i_V = i_c = -i_a$
Período VI (300° a 360°)	$\frac{di_{RVI}}{dt} = \frac{1}{2L} (+V - 2V_Q - 2R_Q i_{RVI} - e_c + e_b)$
	$i_{RVI} = i_c = -i_b$
Transitório VI→I	$\frac{di_{VI}}{dt} = \frac{1}{2L} (-V_D - V_Q - 2R_L i_{VI} - e_c + e_b)$
	$i_V = i_c = -i_b$

Tabela 1. Equações diferenciais do motor Brushless.

6.3. SIMULAÇÃO DO MODELO DO MOTOR BRUSHLESS E DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

A simulação do sistema de acionamento e motor Brushless foi realizada através do Simulink/Matlab. A figura 6.8 apresenta o diagrama de blocos da implementação do sistema, onde foram utilizados três blocos básicos: Chaveamento dos Transistores, Força Contra-Eletromotriz e Modelo da Máquina Brushless.

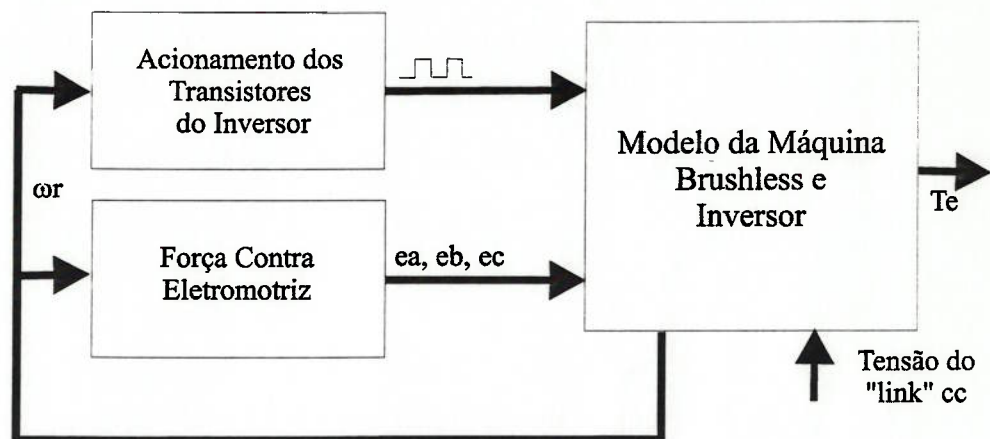


Figura 6.8 Implementação no Simulink do modelo do motor Brushless

O Bloco Força Contra-eletromotriz, como o próprio nome diz, gera a força contra-eletromotriz (“ea”, “eb” e “ec”) das três fases do motor defasadas de 120°. A amplitude de cada força é proporcional à constante elétrica (K_e) da máquina. A frequência da força contra-eletromotriz é diretamente proporcional à velocidade elétrica do motor (ω_r). O valor de K_e foi obtido experimentalmente, em diversos níveis de velocidade, e o valor médio de K_e foi adotado. As figuras 6.9, e 6.10. apresentam os diagramas de blocos de como foram

implementados no Simulink, o acionamento dos transistores e a força contra-eletromotriz. A figura 6.9 mostra um gerador de onda quadrada que produz um pulso a cada 60° elétricos, e este pulso corresponde à liberação do período de condução dos transistores do inversor, que simulam a excitação de cada circuito equivalente, representados no bloco da modelagem da máquina. Este bloco é realimentado pela velocidade elétrica proveniente do modelo da máquina Brushless, fazendo com que o chaveamento esteja em sincronismo com o rotor, assim, o sinal ω_r substitui os sensores de efeito Hall que indicam a posição do rotor.

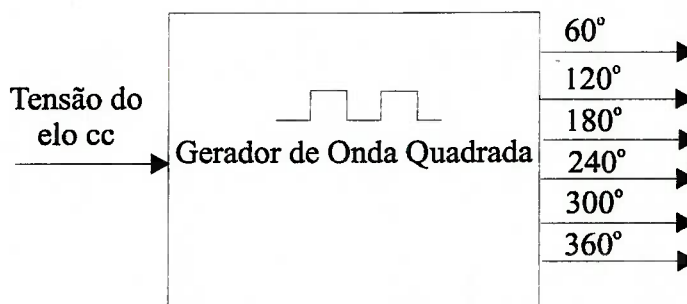


Figura. 6.9. Bloco da seqüência de chaveamento dos transistores do inversor

O Bloco Força Contra-Eletromotriz apresenta um gerador de onda trapezoidal. A figura 6.10 mostra internamente o Bloco Força Contra-eletromotriz, que gera em sua saída, através dos sinais de entrada da velocidade elétrica (ω_r) e de K_e , as formas de onda trapezoidais das três forças contra-eletromotrizes, com amplitude e frequência em sincronismo com a velocidade e torque impostos à máquina

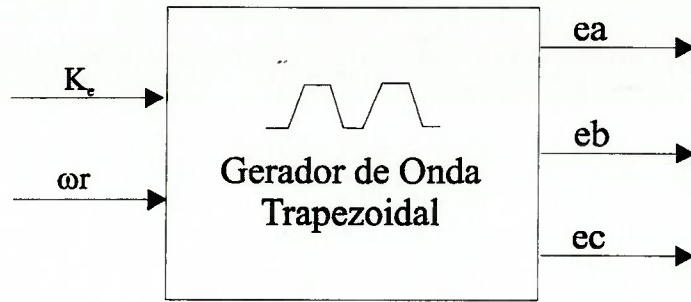


Figura. 6.10. Bloco da Força Contra-eletromotriz

O bloco Modelo da Máquina Brushless pode ser visualizado internamente através da figura 6.11.

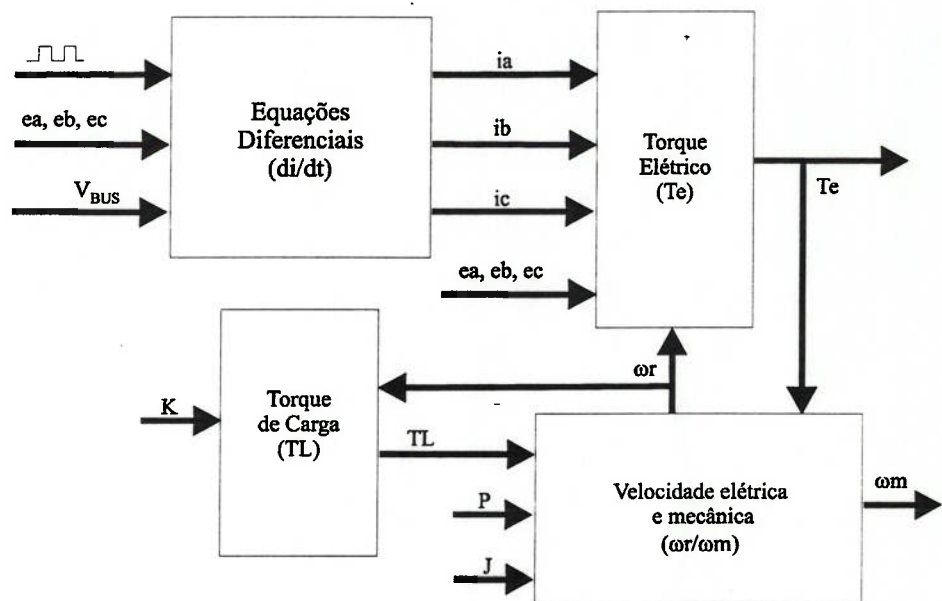


Figura 6.11 Modelo da Máquina Brushless

O Bloco Equações Diferenciais contém todas as 12 equações diferenciais apresentadas na tabela 1. O bloco Torque Elétrico gera o torque elétrico (T_e), através do cálculo da potência da máquina dividida pela velocidade elétrica. O bloco Torque de Carga

calcula o torque imposto à máquina proporcional ao quadrado da velocidade elétrica. O bloco Velocidade Elétrica e Mecânica calcula as velocidades em rad/s e rpm.

Estes blocos foram implementados no Simulink/Matlab e podem ser vistos no apêndice “E”. Os parâmetros utilizados na simulação estão apresentados abaixo:

$$\begin{aligned} L_A &= L_B = L_C = 0.1 \text{ mH} \\ R_A &= R_B = R_C = 0.46 \Omega \\ \omega_{m_n} &= 4500 \text{ rpm} \\ T_{L_n} &= T_{e_n} = 15 \text{ N.m} \\ \text{Tensão de Alimentação} &= 210 \text{ V} \\ K_E &= K_T = 0.12 \\ J &= 0.0037 \end{aligned}$$

A figura 6.12 apresenta o resultado de simulação, contendo as formas de onda das forças contra-eletromotrizes para a máquina em regime permanente.

A figura 6.13 mostra a forma de onda das forças eletromotrizes quando a máquina está em aceleração, onde a amplitude é proporcional a K_e e a frequência é proporcional a ω_r .

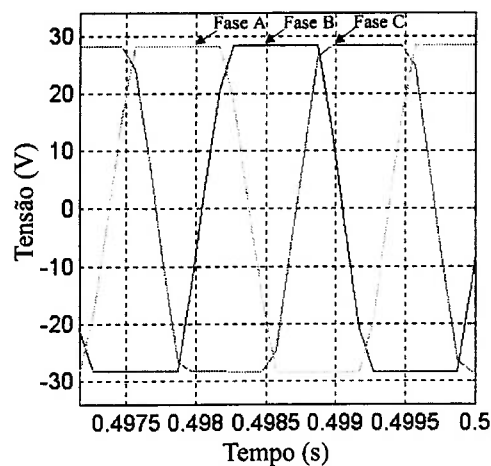


Figura 6.12. Forma de onda das forças contra-eletromotrizes e_a , e_b , e e_c .

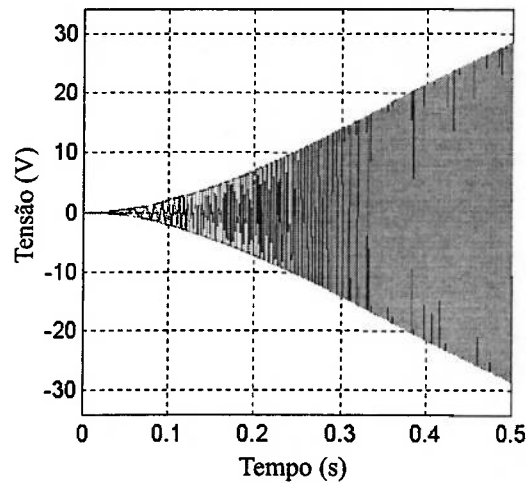


Figura 6.13 Forma de onda das forças contra-eletromotriz e_a , e_b , e_c .

A figura 6.14 apresenta a forma de onda das três correntes, deslocadas de 120° , com a máquina operando em regime permanente.

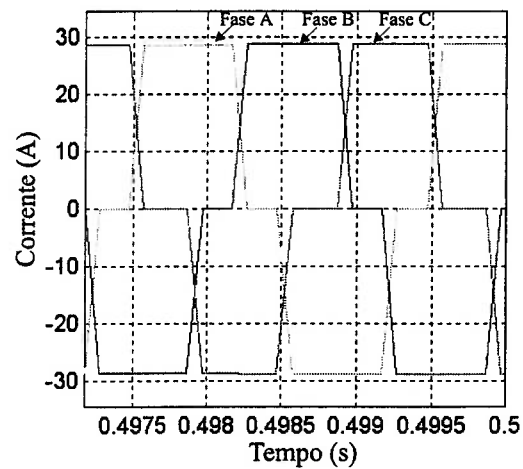


Figura 6.14. Forma de onda das correntes i_a , i_b , i_c .

A figura 6.15 apresenta a resposta para um degrau de torque, partindo-se de zero até atingir o torque nominal. A figura 6.16 apresenta a resposta de velocidade em rotações por minuto (RPM), para o mesmo degrau de torque.

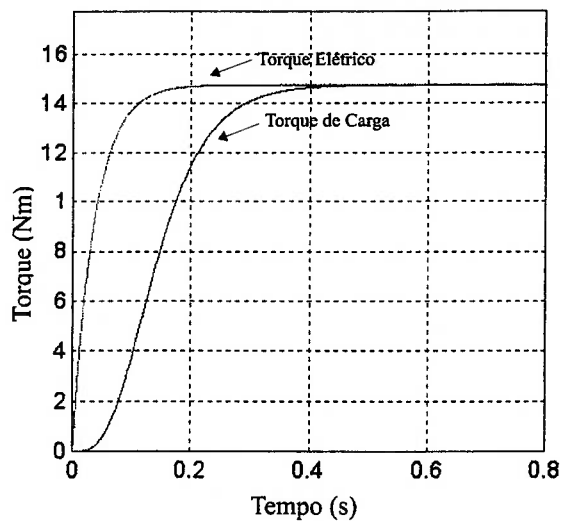


Figura 6.15. Torque elétrico e torque de carga.

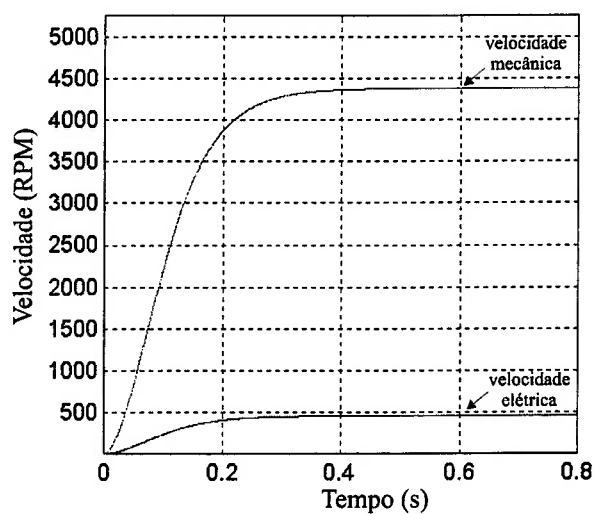


Figura 6.16. Resposta das velocidades mecânicas e elétrica para degrau de torque

Após certificar-se da operação correta em malha aberta, o modelo da máquina Brushless foi simulado em malha fechada, com controle de torque. Um bloco de modulação em largura de pulso (PWM) e um controlador PI foram implementados, permitindo a

variação do torque elétrico, e conseqüentemente a variação da velocidade elétrica e mecânica. A figura 6.17 apresenta o diagrama de blocos do sistema de acionamento e controle de torque do motor Brushless.

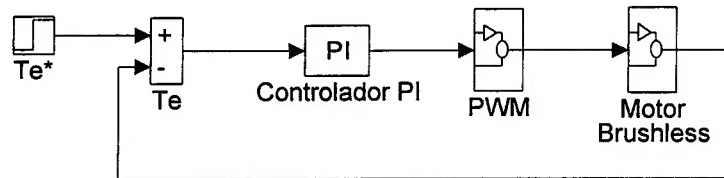


Figura. 6.17 Diagrama de blocos do sistema de acionamento e controle do motor Brushless.

A figura 6.18 apresenta a resposta de velocidade elétrica e mecânica para um degrau de torque de 15 Nm para 11 Nm.

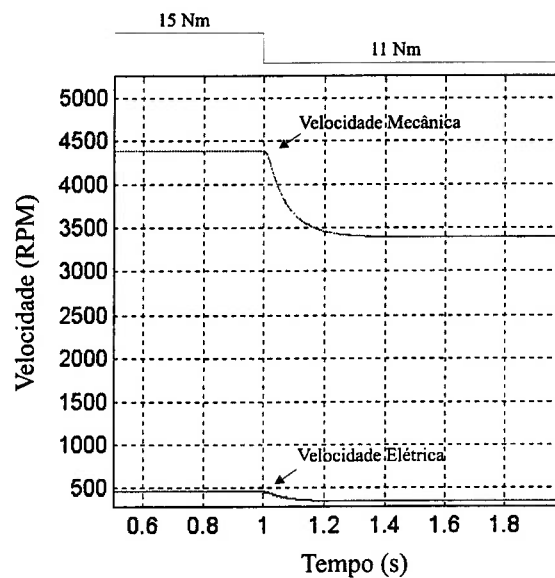


Figura. 6.18. Resposta de velocidade para um degrau de torque negativo

A figura 6.19 apresenta a resposta de velocidade elétrica e mecânica para um degrau de torque de 10 Nm para 15 Nm.

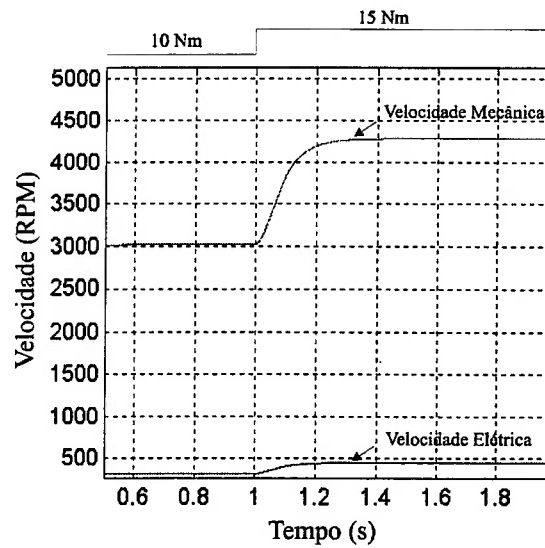


Figura. 6.19. Resposta de velocidade para um degrau de torque positivo

A modelagem da máquina Brushless cc trifásica com o inversor acoplado permitiu o estudo de seu comportamento dinâmico, e os resultados de simulações auxiliaram na implementação do sistemas de acionamento e controle apresentados no capítulo 7.

CAPÍTULO 7

IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1. PAINEL SOLAR

Em um veículo movido à energia solar, toda o suprimento de seu sistema elétrico é proveniente dos painéis solares que cobrem sua superfície.

O Poli-Solar foi coberto inteiramente por células solares. Elas foram ligadas em série formando oito painéis. Quatro painéis foram construídos com células de 16,5 %, e os outros quatro painéis foram construídos com células de 15%. As células foram adquiridas da empresa alemã ASE. A figura 7.1 apresenta a disposição dos painéis solares sobre a superfície do Poli-Solar.

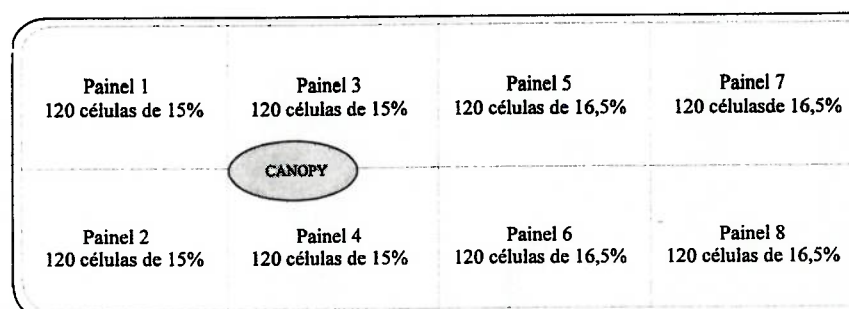


Figura 7.1. Disposição das células solares sobre a superfície do Poli-Solar.

Cada painel solar contém aproximadamente 120 células conectadas em série formando “zig-zag”. No lado de baixo de cada célula solar foram soldados dois

terminais de cobre estanhados, para permitir a conexão em série. Cada célula foi fixada sobre a superfície através de fita adesiva dupla-face, e cada grupo de 20 células recebeu um diodo ligado em polarização reversa, para manter o painel operando, caso alguma célula fosse danificada. A figura. 7.2 apresenta todo o processo de montagem das células solares sobre a superfície do veículo e a figura 7.3 apresenta um exemplo de um painel solar completo montado.

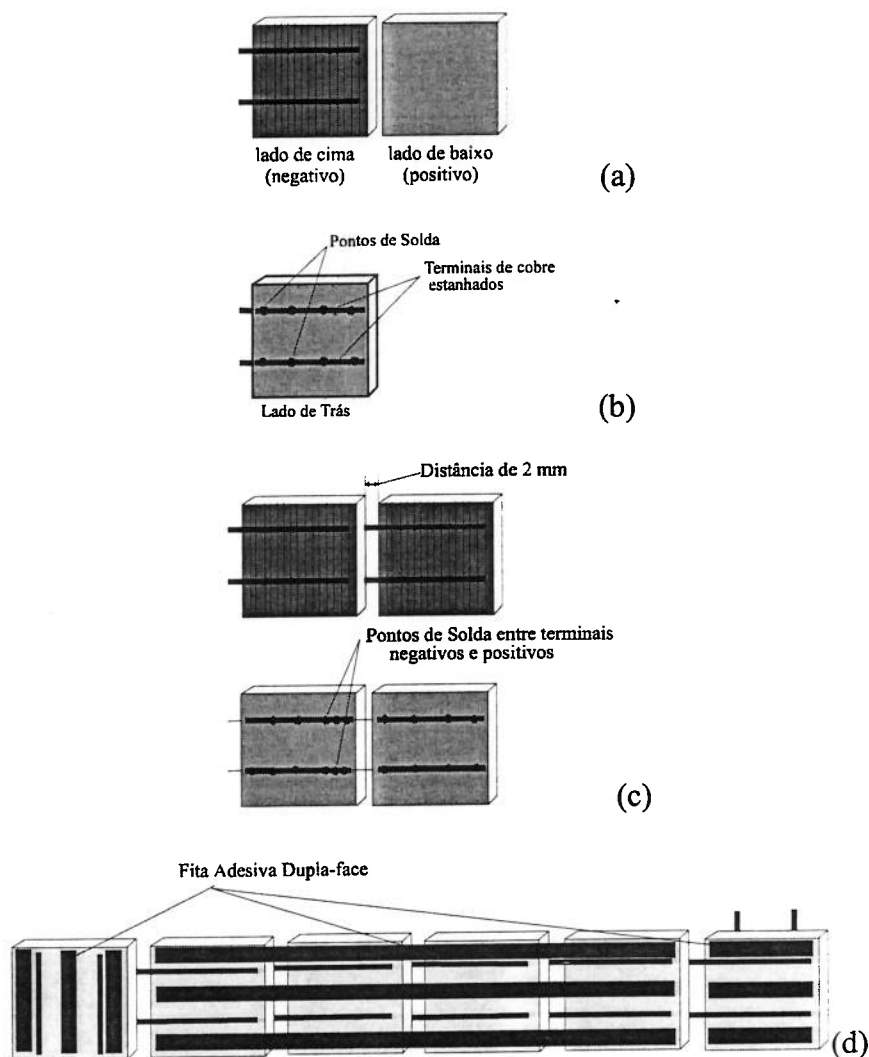


Figura 7.2. Montagem de um conjunto de células solares ligadas serialmente.

- a) Lado de cima (Potencial negativo) e lado de baixo (potencial positivo) de uma célula solar.
- b) Soldagem de terminais no lado de baixo da célula solar.
- c) Ligação serial entre células solares.
- d) Fixação da fita dupla-face sobre o lado de trás da célula.

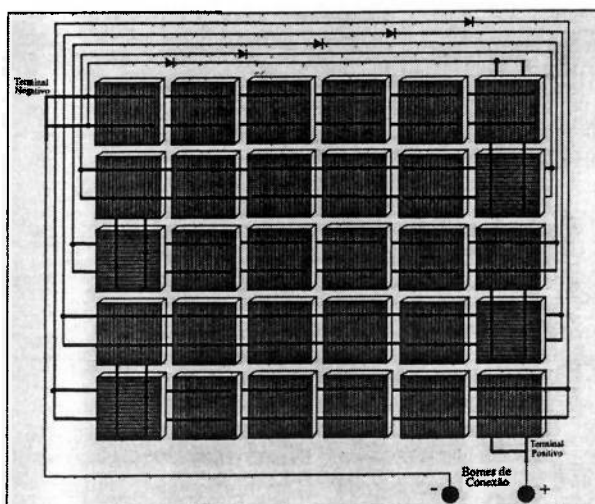


Figura 7.3. Exemplo de um painel solar montado com os diodos de proteção conectados.

Como as células solares são, tecnicamente, de baixo rendimento e por estarem conectadas em série, deve-se tomar rigorosos cuidados nas conexões destas células, uma vez que a resistência de contato pode ser um fator limitante na eficiência final. Outro aspecto importante a ser considerado é a robustez com que o painel solar deve ser montado, pois as células são construídas de materiais semicondutores a base de silício, tendo uma espessura aproximada de 1 mm, tornando-as extremamente frágeis.

Para proteger as células solares das diversidades meteorológicas e choques, foi necessário um encapsulamento adequado, uma vez que o painel deve ser exposto ao tempo por longos períodos, sob sol e chuva. O elemento utilizado foi um percloroetileno denominado "Conformal Coating 1-2577" do fabricante "Dow Corning", que é uma película translúcida aplicada através de pistola de pintura, possui boa impermeabilidade e baixo índice de reflexão. A aplicação foi realizada na proporção de 60% do produto, a base de silicone e 40% de um solvente. Este produto foi escolhido devido ao seu excelente poder diluidor, não ter ação corrosiva sobre metais, e por ser considerado pouco tóxico, por se tratar de um derivado de clorados orgânicos.

7.2. SISTEMA ELÉTRICO

A figura 7.4 apresenta o diagrama de blocos do sistema elétrico do veículo Poli-Solar.

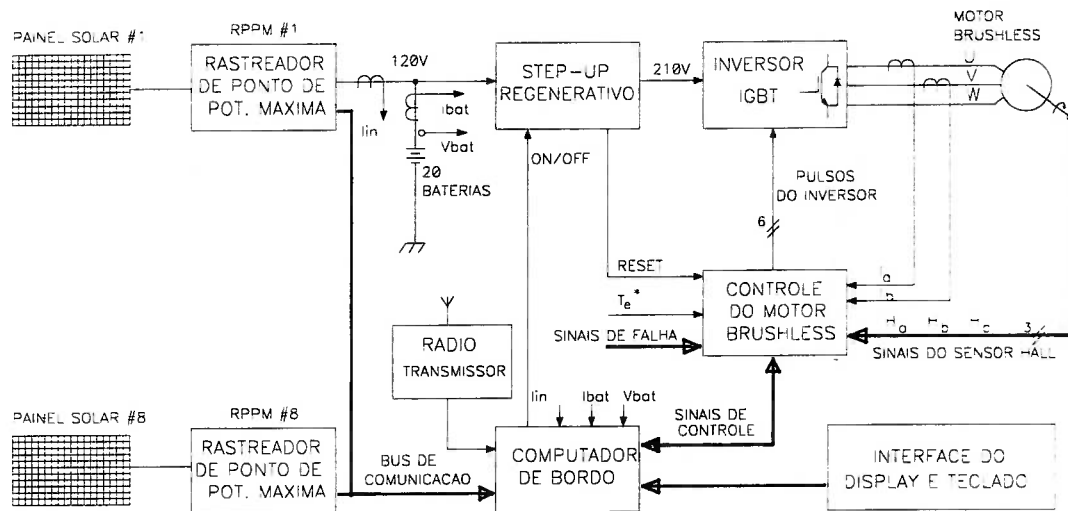


Figura 7.4. Diagrama de blocos do sistema elétrico do Poli-Solar.

A seguir serão descritos detalhadamente cada bloco do sistema elétrico, apresentando a análise dos circuitos e os dados experimentais obtidos em testes.

7.2.1. RASTREADOR DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA (RPPM)

Como descrito anteriormente, a célula solar possui a característica de variar sua potência com a variação de temperatura e luminosidade, assim, para que a máxima potência seja extraída da célula, independente da carga, é necessário utilizar um

circuito conversor denominado Rastreador de Ponto de Potência Máxima (RPPM), que permite a maximização da transferência de potência, através do casamento de impedância do painel solar com o conjunto de baterias e o sistema de acionamento. Este circuito é baseado em um conversor cc-cc tipo “boost”, que pode ser observado na figura 7.5. Ele é semelhante ao proposto por BOSE et al. (1984), SULLIVAN; POWERS (1993) e SALAMEH et al. (1990). O conversor “boost” do Poli-Solar possui um transistor tipo “Power-Mosfet” que realiza o chaveamento de um indutor. Este chaveamento é comandado por um sinal PWM (modulação em largura de pulso), gerado por um microcontrolador RISC PIC16C74 da Microchip, que calcula a potência instantânea, através da leitura de tensão e corrente que flui para a carga, e procura passo a passo o valor da razão cíclica que maximiza a transferência de potência do painel solar. Quando se varia a largura de pulso do transistor, altera-se a impedância de entrada do circuito conversor, existindo um valor ótimo da razão cíclica do chaveamento.

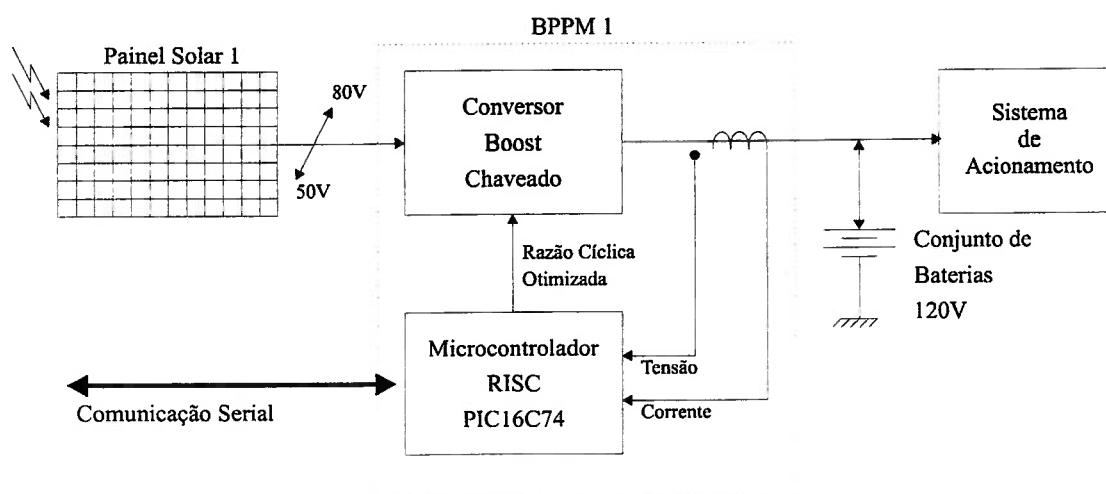


Figura 7.5. Circuito de potência do RPPM.

A procura pelo ponto ótimo de operação é realizado através de um algoritmo de controle tipo "Hill Climbing". O fluxograma do algoritmo é mostrado na figura 7.6. O algoritmo é basicamente uma rotina em tempo real que lê a tensão e corrente na bateria, calcula a média das últimas dez leituras de potência, calcula a variação de potência ΔP_o , compara com a última variação de potência e decide se a razão cíclica deve ser aumentada ou diminuída. Quando a variação de potência for zero, a razão cíclica permanece em seu valor ótimo, pois a máxima potência foi alcançada. O microcontrolador permite também realizar comunicação serial com o computador de bordo do sistema de gerenciamento, fornecendo o valor de tensão e corrente da potência máxima fornecida pelo painel.

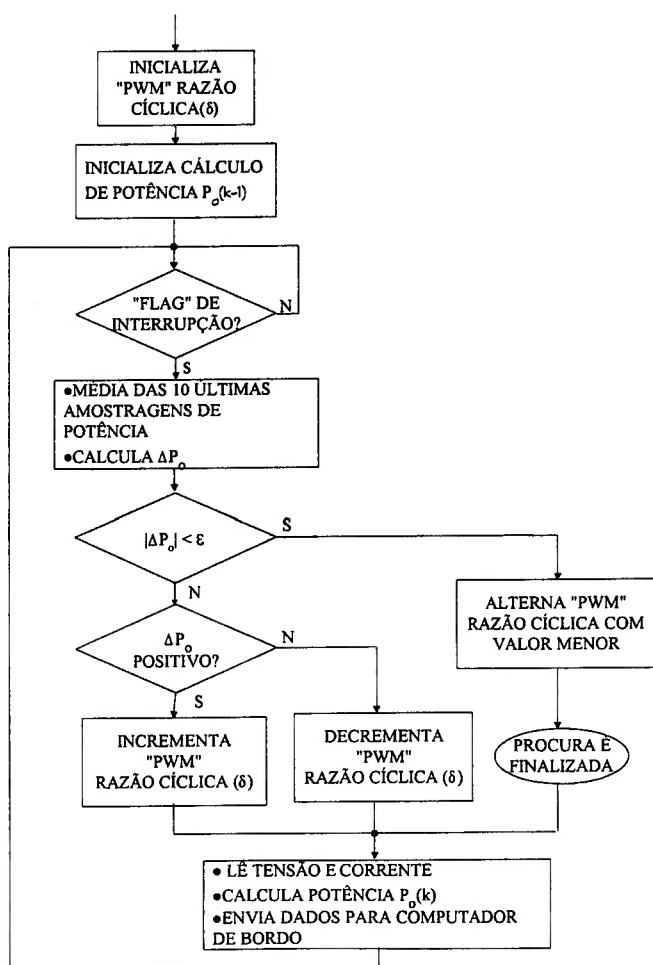


Figura 7.6. Diagrama de blocos do fluxograma do procedimento de procura da razão cíclica ótima.

As figuras 7.7 e 7.8 apresentam resultados experimentais realizados com o RPPM. Na figura 7.7 observa-se a forma de onda do chaveamento do transistor do regulador “boost”, a corrente do painel solar e a corrente da bateria, para dois níveis de intensidade solar. Em ambos os casos, o torque da máquina Brushless do veículo foi mantido constante; portanto, qualquer acréscimo do nível de intensidade resulta num acréscimo de corrente fluindo para a bateria. O teste foi realizado utilizando-se uma célula solar padrão, que mede a quantidade de energia solar fornecida ao painel solar. Inicialmente cobriu-se o painel solar com um plástico semitransparente, obtendo-se através da medição da célula solar padrão um valor de 55mW/cm^2 da intensidade luminosa. Posteriormente este plástico foi retirado, atingindo uma intensidade solar de 90mW/cm^2 . Como pode ser observado, há um valor ótimo do valor da largura do pulso do chaveamento do transistor para a primeira situação, e posteriormente, o PWM se estabelece com um novo valor de razão cíclica, devido ao aumento do nível da intensidade solar. O conjunto de baterias filtra as altas frequências das oscilações de corrente.

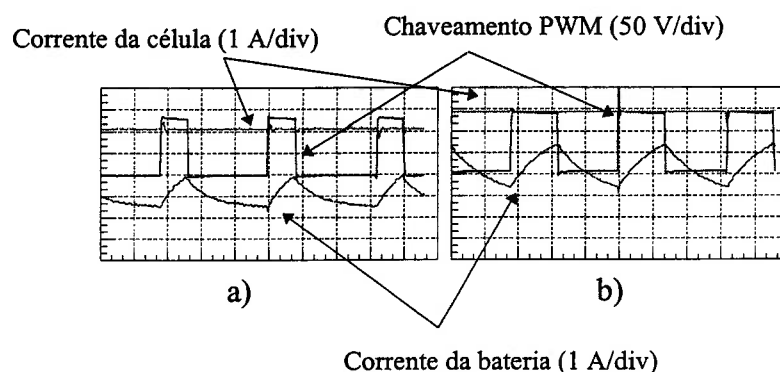


Figura 7.7. Chaveamento do transistor, corrente do painel solar e corrente na bateria.
(a) Resultados para intensidade solar de 55mW/cm^2
(b) Resultados para intensidade solar de 90mW/cm^2

A figura 7.8 mostra uma outra resposta do sistema, onde um degrau de variação do nível de iluminação de $\lambda = 35 \text{ mW/cm}^2$ para $\lambda = 70 \text{ mW/cm}^2$ foi imposto, observa-se a corrente fluindo para o conjunto de baterias após a nova condição de operação ser estabelecida.

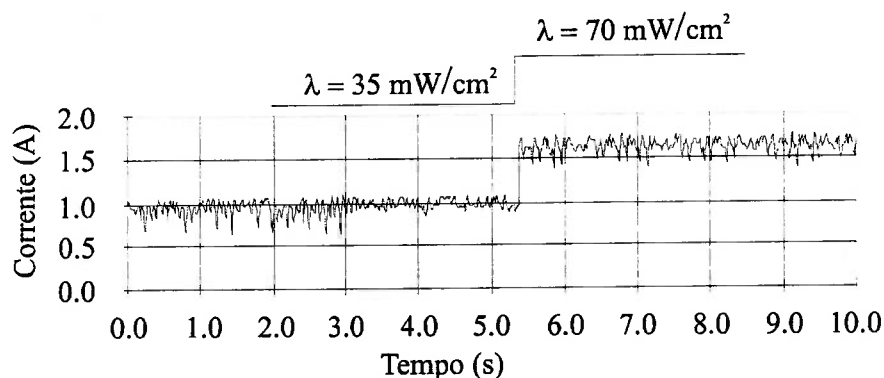


Figura 7.8. Variação da intensidade solar (λ) e a correspondente alteração da corrente.

A eficiência do RPPM foi medida, atingindo sempre um valor superior a 96%.

O apêndice “A” apresenta o esquema elétrico do circuito RPPM.

7.2.2. ELEVADOR DE TENSÃO REGENERATIVO

Como mencionado anteriormente, a tensão fornecida pelo conjunto de baterias é de 120V, sendo a tensão nominal do motor de 210V, para que a velocidade nominal do motor seja atingida, foi necessário elevar a tensão proveniente do conjunto de baterias.

Uma análise entre o peso total das baterias, versus peso e espaço de um circuito elevador de tensão, mostrou que esta última é a melhor opção de configuração para o veículo. Assim a tensão proveniente do banco de baterias é elevada, através de um regulador chaveado elevador de tensão regenerativo, como mostrado na figura 7.9.

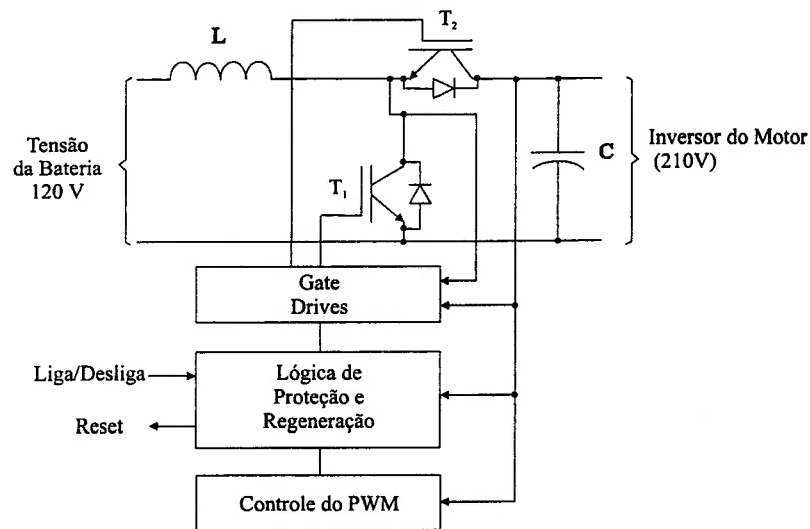


Figura 7.9. Elevador de tensão regenerativo.

O regulador elevador de tensão regenerativo possui dois transistores trabalhando como chaves controladas, implementadas através de IGBT com diodos de “freewheeling” ligados em paralelo. O sistema é regenerativo, permitindo que o fluxo de energia ocorra nos dois sentidos, ou seja, elevando a tensão de 120V para 210V, fornecendo a corrente requerida pelo motor, ou devolvendo-se a corrente para o conjunto de baterias quando a máquina Brushless cc impõe tensão superior ao elo cc. O transistor T_1 do IGBT controla a razão entrada/saída através de PWM, e o transistor T_2 é controlado através do sinal complementar de T_1 , isto é, quando T_1 conduz T_2 corta, e vice-versa. A regeneração pode ocorrer em dois níveis de operação, conforme mostra a figura 7.10, o primeiro ocorre quando a tensão do elo cc supera os 210V até o máximo de 360V, e o segundo quando a tensão é superior a 360V. No primeiro nível, há regeneração através do período de condução da chave de T_2 . No segundo nível, a regeneração ocorre devido à atuação de um comparador por histerese, implementado

através de um circuito analógico. Esse comparador, durante sua atuação, desliga o transistor T_1 e liga o transistor T_2 . A figura 7.10 apresenta um diagrama mostrando os níveis de tensão do elo cc, onde observam-se os níveis de operação da regeneração.

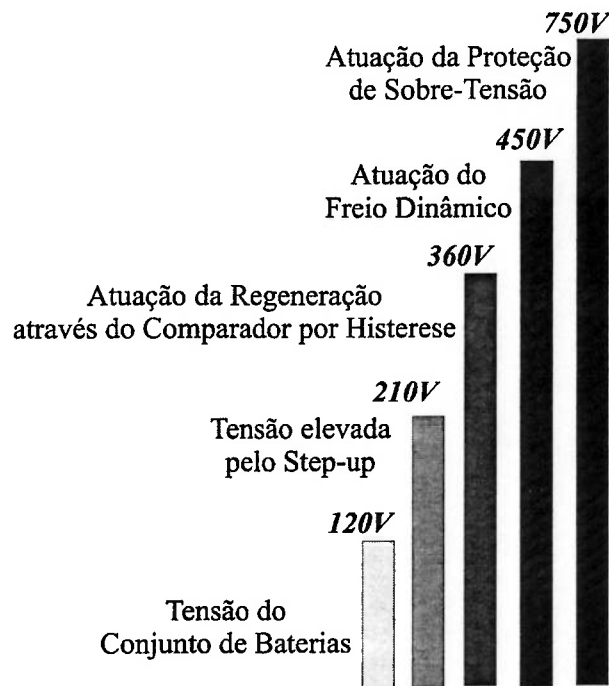


Figura 7.10.. Níveis de tensão do elo cc, mostrando quanto a regeneração ocorre.

As figuras 7.11 a 7.12 apresentam os resultados experimentais do elevador de tensão regenerativo, mostrando o comportamento dinâmico do circuito, para a máquina funcionamento como motor e como gerador.

A figura 7.11 apresenta o comportamento dinâmico quando o circuito está trabalhando em regime de operação normal, ou seja, quando a máquina Brushless cc está trabalhando como motor. Observa-se o chaveamento no transistor T_1 , onde a corrente com valor positivo indica que a corrente flui do conjunto de baterias e/ou sistema fotovoltaico para a máquina.

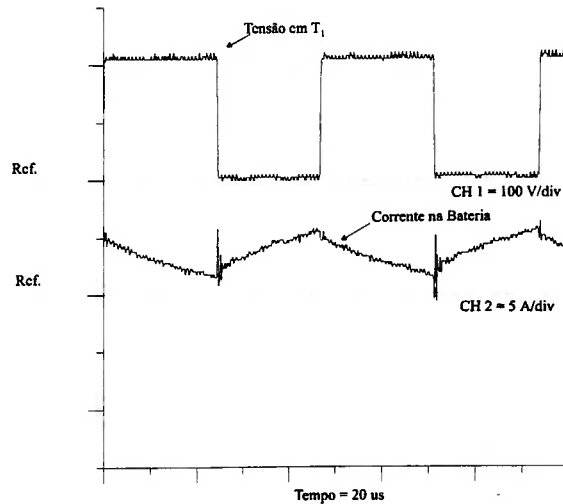


Figura 7.11. Resultado experimental do elevador de tensão alimentado a máquina Brushless.

O primeiro nível de regeneração pode ser observado através da figura 7.12, onde a tensão do elo cc está superior a 210V, fazendo com que ocorra regeneração através do chaveamento do transistor T_2 . A corrente, neste caso, está com valor negativo indicando que a máquina Brushless está trabalhando como gerador, e o seu fluxo de corrente está ocorrendo da máquina para o conjunto de baterias.

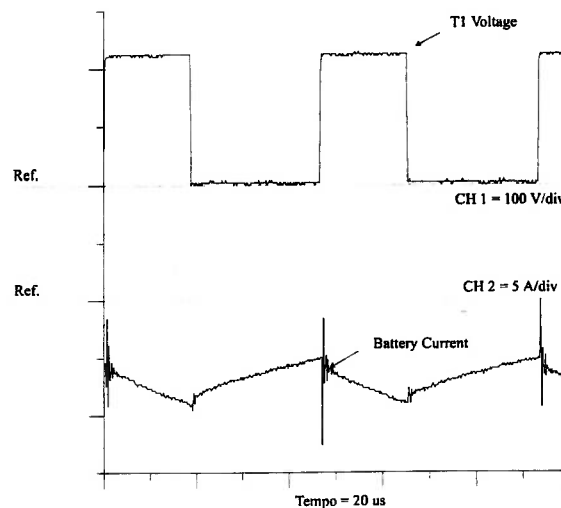


Figura 7.12. Resultado experimental do elevador de tensão regenerando no primeiro nível.

A figura 7.13 apresenta o resultado experimental para quando a máquina Brushless está operando como gerador e o nível de tensão do elo cc superou 360V. Neste caso, o comparador por histerese atuou forçando o desligamento da chave T1 e ligando a chave T2. Observa-se a ondulação causada na tensão do elo cc, devido à regeneração ocorrida. A forma de onda da corrente mostra seu sentido de fluxo e os momentos de atuação do comparador.

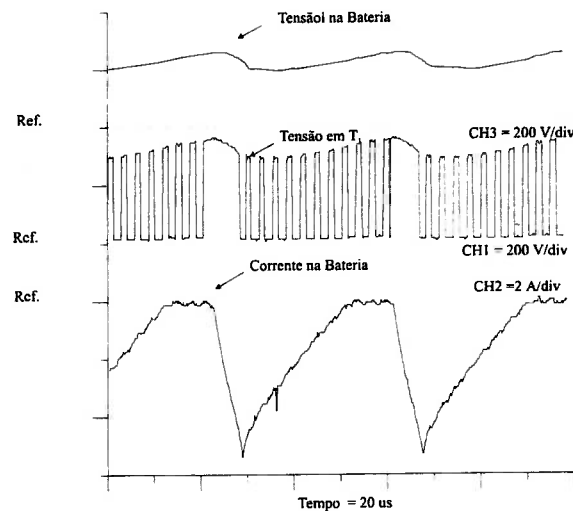


Figura 7.13. Resultado experimental do elevador de tensão regenerando no segundo nível.

O circuito de controle possui ainda um sistema de atuação por falha. Caso durante uma situação de regeneração o circuito Step-up Regenerativo, por algum motivo sofra alguma falha, este automaticamente desliga o transistor T_1 , impondo a condição de condução constante ao transistor T_2 , o que implica em estabelecer no elo cc a tensão constante de 120V. A figura 7.14 apresenta esta situação. Observa-se que a corrente flui para a bateria, caracterizando a regeneração, e a tensão do elo cc se estabeleceu em 120V.

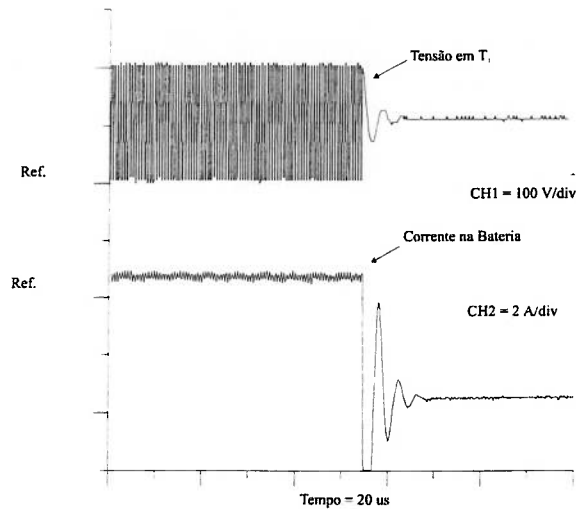


Figura 7.14. Resultado experimental. Elevador de tensão desligado durante regeneração.

O apêndice “A” apresenta o esquema elétrico do circuito elevador de tensão regenerativo.

7.2.3. SISTEMA DE CONTROLE E ACIONAMENTO DO MOTOR

O sistema de controle comanda os sinais necessários para o acionamento do circuito inversor trifásico do motor Brushless cc. A figura 7.15 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle do acionamento. O nível de torque de referência (T_e^*) é imposto manualmente através de um potenciômetro, ou gerado pelo computador de bordo. O torque de referência (T_e^*) é comparado ao torque estimado, sendo este reconstruído através das correntes instantâneas da máquina i_a e i_b , e por uma chave analógica, baseado em um circuito comandado por uma tabela, que endereça as inversões e adições necessárias para construir a corrente de torque I_T . A saída do controlador PI é modulada em largura de pulso através de uma frequência portadora

triangular de 20 kHz. Os sinais provenientes dos sensores de efeito Hall (H_a , H_b e H_c) são comparados com os valores da tabela de informação contida na memória ROM, gerando a seqüência de fase da máquina, com o objetivo de impor os pulsos ao inversor, com “dead-time” entre o tempo de subida e descida de 5 μ sec.

Há ainda um circuito de gerenciamento de falhas que recebe sinais com informações do valor da tensão do conjunto de baterias, temperatura e “reset”, possibilitando desligar o inversor em caso de falha.

O circuito do sistema de controle do acionamento foi implementado analogicamente e seu esquema elétrico pode ser visto no apêndice A.

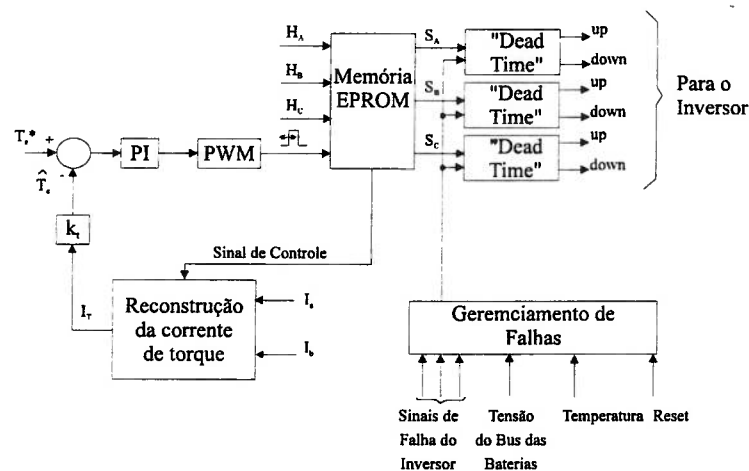


Figura 7.15. Diagrama de blocos do sistema de controle do acionamento da máquina Brushless cc.

O sistema de controle do sistema do acionamento foi testado em laboratório, utilizando todo o conjunto de rodas e engrenagens conectado ao eixo da máquina. O desempenho do sistema é mostrado através das figuras 7.16 a 7.19.

A figura 7.16 apresenta o resultado experimental para uma imposição de torque positivo. Durante o transitório a máquina foi mantida com velocidade constante de 650 RPM.

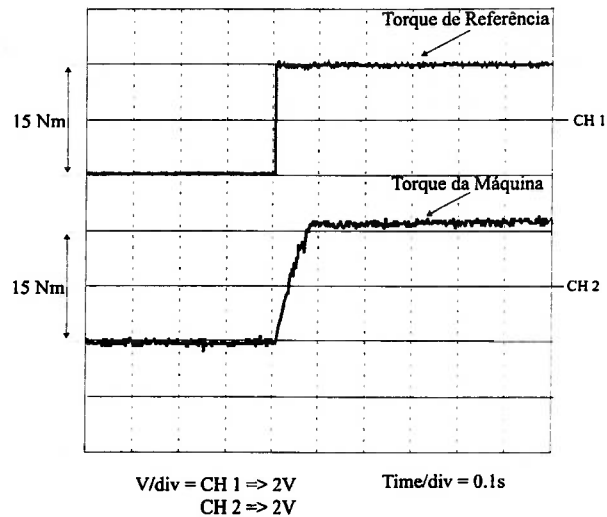


Figura 7.16. Resultado experimental. Comando de torque positivo (+15 Nm), velocidade constante (650 RPM).

A resposta do sistema para um de torque negativo é apresentado na figura 7.17. Um comando de -15 Nm foi imposto ao sistema de acionamento, onde durante o transitório a máquina foi mantida com velocidade constante de 650 RPM.

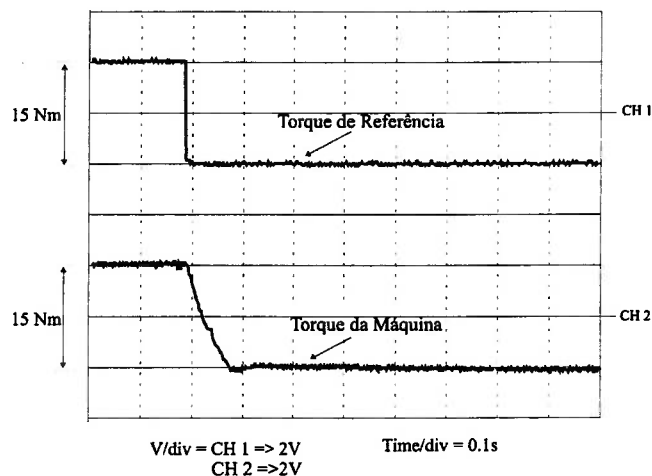


Figura 7.17. Resultado experimental. Comando de torque negativo (-15 Nm), velocidade constante (650 RPM).

A resposta da malha de velocidade, é apresentada na figura 7.18 mostrando o torque e velocidade instantânea para um degrau de referência de 250 RPM.

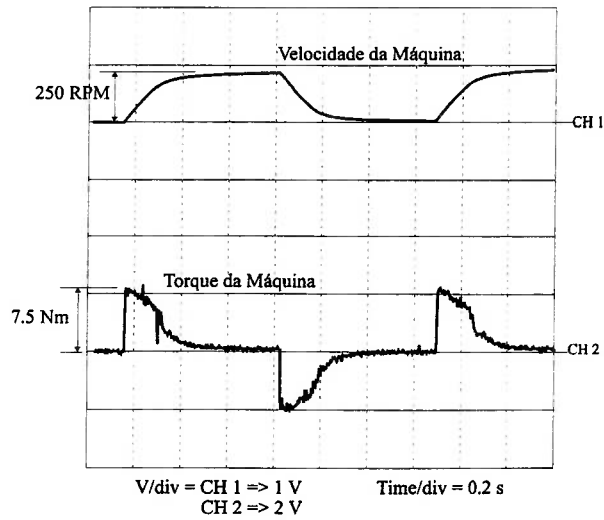


Figura 7.18. Resultado experimental. Comando de velocidade constante (+ 250 RPM) e resposta do torque da máquina.

A tensão e corrente da máquina em regime permanente podem ser observadas na figura 7.19.

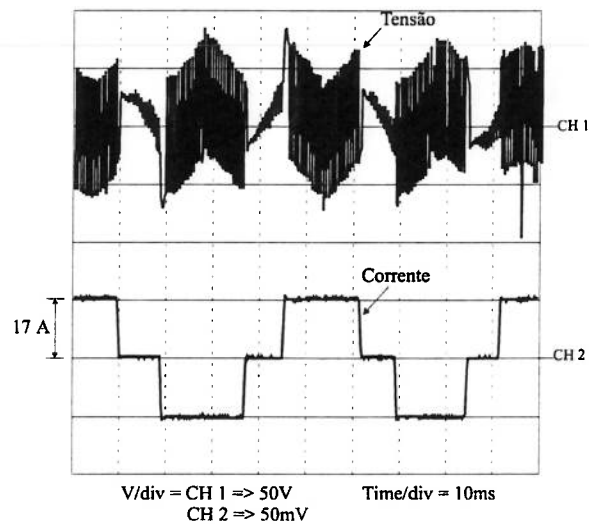


Figura 7.19. Resultado experimental. Tensão e corrente na máquina em regime permanente.

7.2.4. INVERSOR TRIFÁSICO

Como mencionado anteriormente o sistema de acionamento do veículo é formado por um circuito inversor trifásico, responsável pelo acionamento do motor. O inversor foi implementado com “gate-drives” e módulos IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) de 1300V de V_{DS} e 75 A de I_{DS} , da Semikron. Os IGBTs são acionados pelos “gate-drives”, que por sua vez são comandados por pulsos do sistema de controle. Circuitos de proteção de sobre-tensão e de “dead-time” foram incorporados ao inversor. Com o objetivo de reduzir os transitórios impostos ao elo cc, um freio dinâmico com histerese atua quando a tensão atinge 450 V, e diodos “zener” eliminam picos de tensão superiores a 750V, como pode ser observado na figura 7.7. O apêndice “A” apresenta o esquema elétrico da implementação do inversor.

7.2.5. COMPUTADOR DE BORDO

Para que o piloto interaja com o veículo, um computador de bordo foi desenvolvido, de forma que se possa monitorar todo o sistema elétrico e alterar a velocidade e torque através de um teclado. A figura 7.17 apresenta o diagrama de blocos do computador de bordo. Ele é constituído por um mostrador de cristal líquido (LCD) e um teclado, sendo baseado em um microprocessador 68HC11 da Motorola. As informações de corrente e tensão das baterias e painéis solares são monitoradas através de seus canais conversores analógicos/digitais, e podem ser transmitidas via rádio para um computador auxiliar em um veículo de suporte.

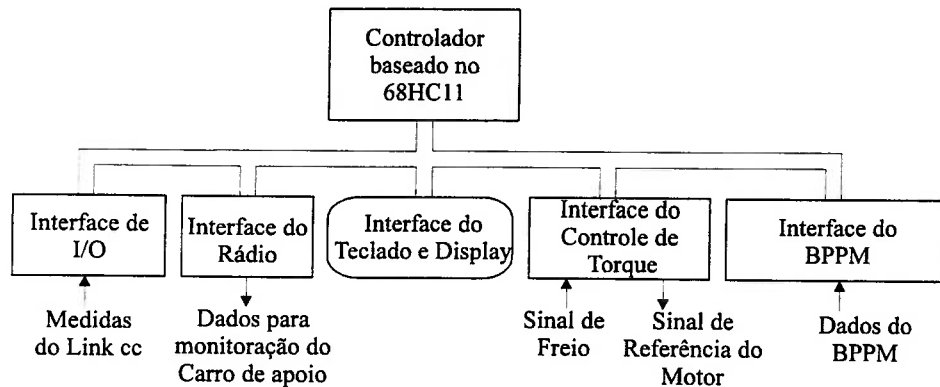


Figura 7.20. Diagrama de blocos do computador de bordo.

O computador de bordo proporciona ao piloto trafegar em dois modos de controle, o primeiro é quando a velocidade se mantém constante, denominada modo de controle de velocidade, o segundo é quando um controle de torque é exigido, denominado modo de controle de torque.

A figura 7.21 apresenta a seqüência de operação para ligar e desligar o veículo. O funcionamento do sistema inclui “start-up” e “shutdown”, realimentação com malha de velocidade ou torque, sistema de monitoração, comunicação para gerenciamento energético e cálculo da velocidade média ótima dependente da estratégia de corrida. Durante o “start-up”, o conjunto de baterias é manualmente conectado, posteriormente os capacitores do elo cc se carregam, elevando a tensão do inversor. Neste momento os capacitores dos RPPMs são carregados, sendo sensorizados com comparadores analógicos, e conectados aos painéis solares através de relés internos. Existe um procedimento de “soft-start”, realizado através do aumento gradativo da razão cíclica do RPPM e do início de operação do algoritmo de busca da máxima potência. Quando os painéis solares estão operacionais e fornecendo energia para o conjunto de baterias, o computador de bordo entra em operação e alguns testes são realizados. Neste momento o piloto pode operar o veículo manualmente, no modo de controle de toque, ou ajustar a

velocidade no modo de controle de velocidade. Quando o freio é acionado, o sistema passa automaticamente para o modo de controle de torque, permitindo que o comando seja feito manualmente. O processo “shutdown” é realizado pelo piloto, ou automaticamente quando da ocorrência de algum sinal de falha do sistema.

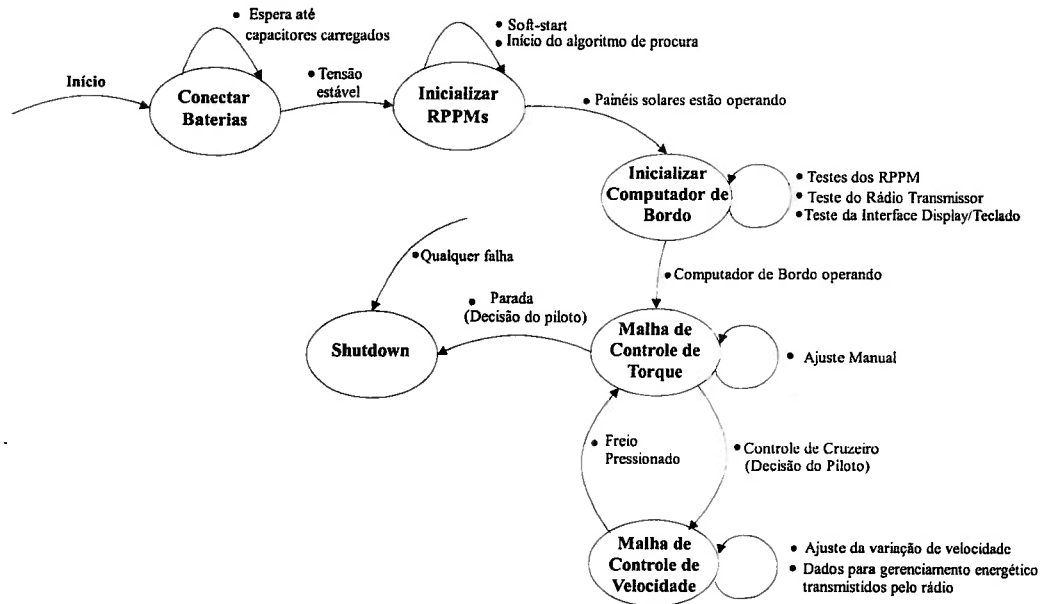


Figura 7.21. Diagrama do sequenciamento de operação do Poli-Solar.

O apêndice “A” apresenta o esquema elétrico completo da implementação do computador de bordo

CAPÍTULO 8

PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros procura-se discutir neste capítulo a necessidade de se desenvolver um modelo energético para o Poli-Solar. O objetivo de um modelo energético de um veículo solar é capacitar o piloto e os membros de uma equipe, em uma competição, a utilizar uma estratégia de corrida que possibilite otimizar o consumo de energia em relação à energia gerada.

8.1. MODELO ENERGÉTICO DO POLI-SOLAR

O principal objetivo em um veículo movido à energia solar é a obtenção da máxima eficiência com o mínimo de peso. A eficiência é a combinação da integração dos componentes do sistema com um determinado trajeto, levando-se em consideração a superfície e seus gradientes, a previsão das condições meteorológica e a estratégia de corrida.

A energia elétrica disponível para a conversão mecânica deve ser utilizada de forma estrategicamente racional, dependendo das necessidades de torque e velocidade impostas ao veículo. A figura 8.1 mostra o diagrama de conversão energética de um veículo solar, onde

a energia solar é convertida em energia elétrica através da conversão fotovoltaica e posteriormente, a energia elétrica é convertida em energia mecânica através de um motor.

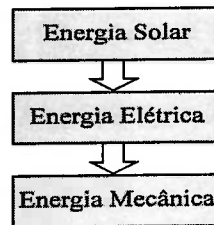


Figura 8.1. Diagrama de conversão energética.

8.1.1. FATORES ENERGÉTICOS

A conversão fotovoltaica é a conversão da energia solar em energia elétrica através da utilização de painéis solares. O painel é composto por várias células solares ligadas em série. Como pode ser observado na figura 8.2, a quantidade de energia convertida depende basicamente de dois fatores: intensidade luminosa aplicada ao painel solar e as características físicas inerentes ao processo de fabricação da célula solar.

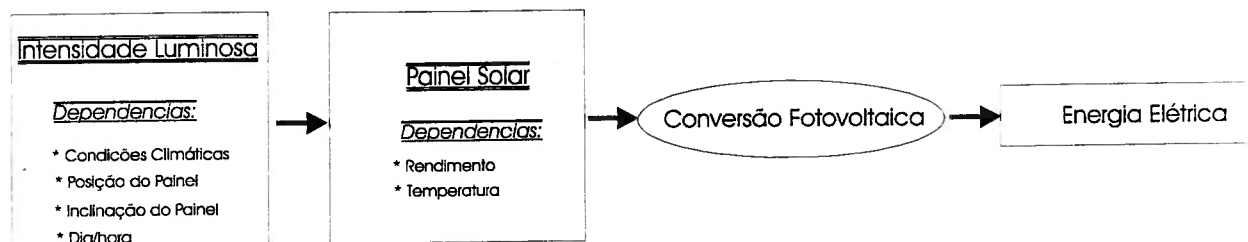


Figura 8.2. Diagrama de conversão fotovoltaica.

A intensidade luminosa aplicada ao painel solar depende dos fatores:

- *Condições climáticas:*

Para um dia de sol a quantidade de energia solar será maior que a de um dia nublado ou chuvoso.

- *Posicionamento do painel solar em relação ao sol:*

A latitude e a longitude onde se encontra o painel solar afeta a quantidade de energia elétrica gerada.

- *Inclinação do painel em relação ao sol:*

O ângulo de incidência da luz do sol sobre o painel solar também afeta diretamente a conversão fotovoltaica. Para um veículo solar, em particular, esta variável depende, além da posição do veículo em relação ao sol, das características de relevo da pista.

- *Data e horário*

O sol está mais perto ou mais distante, dependendo da época do ano, e como a intensidade solar varia durante o período de um dia, estes fatores afetam a conversão fotovoltaica.

Os fatores inerentes às características físicas das células solares são:

- *Rendimento das células:*

O processo de fabricação das células solares determina o seu rendimento

- *Temperatura no painel solar:*

A temperatura do painel afeta o desempenho da conversão fotovoltaica.

Em um veículo solar, existem perdas de conversão da energia solar em elétrica, que são causadas principalmente por aquecimento devido a circuitos eletrônicos utilizados na armazenagem da energia captada, no acionamento e controle do motor, e nos sistemas de supervisão. Portanto, o projeto eletrônico de um veículo solar deve ser otimizado, de forma a possuir a maior eficiência possível.

Existem também perdas na conversão de energia elétrica em energia mecânica, que são causadas principalmente devidos à aerodinâmica do veículo e atrito de rolamento.

8.2. ESTRATÉGIA DE ACIONAMENTO

Como descrito anteriormente, o veículo Poli-Solar foi desenvolvido e construído com o objetivo, dentre outros, de participar da WSC. Nesta competição, na largada, pode-se estar com as baterias totalmente carregadas, e a partir daí, somente a energia solar pode recarregá-las. Normalmente, os veículos solares típicos da WSC, ao andarem somente com as baterias, possuem uma autonomia de apenas 1 hora. Como a corrida é de aproximadamente 5 dias e inicia-se às 8:00 e termina às 17:00 hs, se um veículo terminar o dia com as baterias totalmente carregadas, significa que ele não otimizou o consumo, pois provavelmente, poderia ter-se andado mais rápido do que andou, e em caso contrário, se utilizou toda a energia disponível nas baterias, pode-se não ter energia suficiente no outro dia para partir. A competição permite que antes da 08:00 e após as 17:00 horas, os painéis possam continuar recarregando as baterias. Durante a corrida, é possível obter informações

sobre as condições meteorológicas para as próximas horas. O comprometimento de quando deixar de energia armazenada para o dia seguinte, e quanto de energia poderá ser recolhido, após o período de corrida, depende basicamente da estratégia de corrida (acionamento) empregada.

Para realizar uma estratégia de acionamento de forma a otimizar o consumo de energia em relação à energia gerada, deve-se levar em consideração as variáveis envolvidas na conversão fotovoltaica e as perdas na conversão elétrica/mecânica, onde a variável de saída a ser controlada é a demanda do motor.

Uma estratégia que pode ser empregada, é a de verificar, em intervalos regulares de tempo, se a velocidade desenvolvida pelo veículo é a mais adequada em relação à estimativa de energia a ser gerada e consumida.

Todos os cálculos para a estratégia de acionamento são realizados para uma pista reta e plana, similar à da WSC. As variáveis que devem ser monitoradas no veículo, para efetuar a estratégia de acionamento são a estimativa de energia a ser gerada, as condições de carga da bateria, e a informação do consumo para a velocidade empregada.

8.3. PROPOSTA DE MODELO ENERGÉTICO

A estimativa de energia a ser gerada, para um determinado período de tempo, pode ser realizada através de um programa que calcula a potência a ser gerada, baseado em informações meteorológicas, posição de latitude, longitude e relevo, dia, e hora. A condição

atual de carga da bateria pode ser calculada a partir do valor de carga inicial, do fluxo de corrente de entrada e do fluxo de corrente de saída. A quantidade de energia necessária para acionar o veículo, por um determinado período de tempo, pode ser calculado monitorando-se a corrente fornecida pela bateria e pelo painel solar, necessárias para a velocidade empregada.

A quantidade de energia necessária para tracionar um veículo solar, dentro de toda a faixa de velocidade permitida, pode ser também calculada através de informações de projeto, como atrito de rolamento e o arrasto aerodinâmico. Porém, para o caso do arrasto aerodinâmico é necessário submeter o veículo a um túnel de vento devidamente instrumentado, algo que infelizmente não é possível na maioria das vezes.

Neste sentido, deve-se submeter o veículo a testes em rodovias retas e planas, monitorando o consumo de energia para cada nível de velocidade imposta, de forma a construir uma tabela relacionando a eficiência do veículo em termo de velocidade.

Quando confrontado com a estimativa de energia a ser coletada, observa-se que existe uma velocidade média ótima. Assim, para uma certa quantidade de energia estimada a ser coletada em um certo período de tempo, o veículo deve ser pilotado de forma a manter a velocidade o mais próxima possível da velocidade ótima.

As medidas de potência em cada painel solar, velocidade do veículo, torque na máquina Brushless e corrente de bateria, devem ser monitoradas por um software de gerenciamento energético, que determina qual a velocidade ideal, a ser imposta a malha de controle de velocidade. Como este cálculo necessita de um certo tempo de processamento, um rádio transmissor deve enviar as informações recolhidas pelo computador de bordo para

um computador portátil, em um carro auxiliar. Este computador portátil pode calcular quanta carga existe na bateria, através da integração da corrente da bateria amostrada.

Para estimar a potência coletada, um modelo baseado na Esfera Celestial, proposto por WALRAVEN (1978), apresentada na figura 8.4 e descrito abaixo, deve ser implementado no computador portátil, que ao receber informação do computador de bordo estima a quantidade de potência que cada painel irá fornecer. O modelo pode ser ajustado através de experimentação de tentativa e erro, com a ajuda de uma célula solar de referência, que mede a intensidade solar momentânea.

A intensidade luminosa incidente sobre o painel solar, está diretamente relacionada à posição do painel solar em relação ao sol. Assim a potência máxima a ser extraída do painel solar depende de sua posição geográfica, ou seja, latitude e longitude. Desta forma, para o cálculo da estimativa de energia gerada por um painel solar, deve-se levar em consideração o ângulo de incidência dos raios do sol sobre as células. A determinação deste ângulo não é tão trivial, pois a posição do sol varia continuamente durante o dia, de forma diferente, conforme a região da Terra e época do ano. Assim, um painel solar posicionado no pólo norte não é iluminado ao longo do dia da mesma forma que um situado na linha do equador. E o mesmo painel não é iluminado da mesma forma no verão e no inverno.

No caso de veículo solar, tem-se um agravante, o painel solar encontra-se em movimento. No caso de uma competição como a WSC, o trajeto da corrida é de 3010 km do norte para o sul, o que significa que as variações de latitude não podem ser desprezadas, devendo ser atualizadas periodicamente para efeito de cálculos.

Estudos realizados, permitem a geração de tabelas com valores de resolução angular

da ordem de décimos de segundo de grau, como por exemplos, as tabelas contidas no Almanaque Hemisférico e Náutico dos EUA e apresentadas por WALRAVEN (1978). Tais valores, no entanto, implicam num complicado algoritmo e em um lento processamento de dados. Isso ocorre porque a excessiva precisão exige que se leve em consideração detalhes como perturbações na órbita da Terra em função da posição da lua, precessão terra-lunar, refração na atmosfera, etc. A demora de processamento decorrente de tais cálculos torna-se indesejável quando se trabalha com fatores que necessitam ser constantemente atualizados, com no caso específico, a posição do veículo.

Para uma precisão de 0.01 graus, pode-se fazer um algoritmo que considere menos fatores perturbadores, e para fins práticos, com a mesma eficiência, podendo ser rapidamente processado em um computador pessoal. Tais considerações são fundamentais, pois no caso em questão, velocidade de processamento em um equipamento portátil é uma necessidade.

Para se computar as variáveis de interesse é necessário, primeiramente, realizar um estudo que permita mais facilmente determinar a localização do sol. A dificuldade está no fato de se analisar o problema a partir do referencial da Terra, que está simultaneamente realizando movimento de rotação e de translação em torno do sol.

Para simplificar a visualização, pode-se com os devidos ajustes, elaborar um modelo no qual a Terra é o centro do universo, com o sol girando ao seu redor.

Ainda segundo WALRAVEN (1978), um recurso muito utilizado por astrônomos, é denominada de Esfera Celeste, que pode ser observada na figura 8.4, onde a terra está no centro de uma esfera com raio infinito. Neste modelo a Terra permanece parada, enquanto a

Esfera Celeste gira ao seu redor. O plano que contém o equador da Terra intercepta a esfera, denominada Equador Celeste. O movimento do sol em torno da Terra é representado por uma órbita denominada Elíptica. O plano que contém a Elíptica forma um ângulo de 23,5 graus com o plano do Equador Celeste. O sol realiza uma revolução por ano ao longo da Elíptica, na direção contrária à de rotação da Esfera Celeste. O círculo que passa pelo Pólo Norte Celeste e pelos equinócios de primavera e outono é chamado de Círculo Horário.

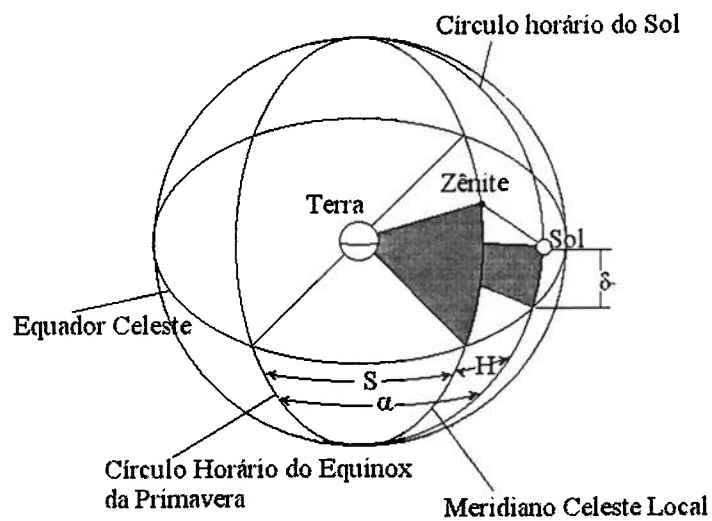


Figura 8.4. Representação do modelo da Esfera Celeste.

8.4. INFORMAÇÕES OBTIDAS NA WSC

A figura 8.5 apresenta duas medições de intensidade solar, com condições meteorológicas diferentes durante a trajetória da corrida na Austrália, observa-se que energia coletada se altera drasticamente em condições de luminosidade diferente.

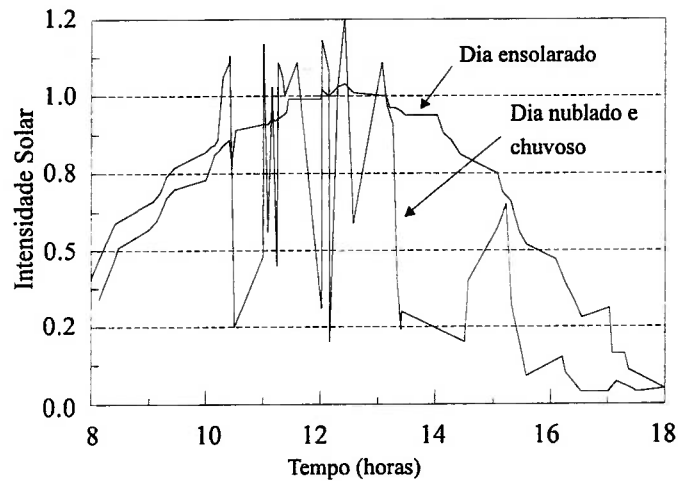


Figura 8.5. Gráficos referentes à luminosidade em duas rotas Australianas.

O cálculo da velocidade média ótima é válido para períodos de condições de tempo estáveis, que devem ser avaliados através de informações meteorológicas e da experiência dos membros da equipe. Para um dado período de tempo o seguinte procedimento pode ser adotado para calcular a quantidade de energia estimada:

- Calcular as coordenadas da posição geográfica
- Medir a incidência solar com a célula de referência
- Calcular a potência em cada painel solar
- Estimar o total de energia a ser coletada na rota
- Estimar a energia armazenada na bateria
- Calcular a velocidade ótima para a rota
- Manter a velocidade média ótima

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um completo sistema de acionamento e controle de um veículo movido à energia solar que participou da 4ª World Solar Challenge (WSC), na Austrália em 1996. A evolução dos veículos elétricos foi abordada, apresentando o atual estágio de desenvolvimento. A energia fotovoltaica é apresentada como uma das grandes fontes de energia alternativa, segura e renovável, que deve ser melhor explorada. A energia solar foi aplicada à veículos elétricos, e competições em diversos países do mundo, incentivam a sua utilização. A WSC é a mais importante destas competições, sendo considerada como um grande laboratório para o desenvolvimento da conversão fotovoltaica, novos conceitos para veículos elétricos, baterias e sistema de acionamento e controle. O veículo Poli-Solar foi apresentado mostrando suas características mecânicas e elétricas.

O Sistema de conversão fotovoltaica foi modelado e simulado através do software Simulink/Matlab. Um modelo de uma célula solar, utilizada no painel do veículo, foi desenvolvido, permitindo que estudos de estratégias de controle para obtenção da maximização da transferência de potência para o sistema de acionamento e baterias, fossem

realizados. Todo o sistema de conversão fotovoltaica foi implementado através de um circuito conversor tipo “boost”, utilizando um algoritmo tipo “hill climbing”, programado em um microprocessador. Testes indicaram que o desempenho do circuito é sempre superior a 96%.

Foi explicado porque o veículo possui um circuito elevador de tensão regenerativo, baseado em um conversor tipo “boost”. Este circuito foi modelado e simulado. Os resultados das simulações foram apresentados, mostrando seu comportamento dinâmico. O sistema foi implementado utilizando módulos IGBTs, e um sistema de controle de fluxo de energia possibilitou a regeneração do fluxo de corrente quando a máquina Brushless do veículo passa a trabalhar como gerador.

O sistema de acionamento e controle do motor Brushless trifásico de corrente contínua foi apresentado. O motor Brushless foi modelado em conjunto com o circuito inversor. O sistema foi simulado através do Simulink/Matlab e seus resultados foram apresentados mostrando seu comportamento dinâmico. Todo o sistema foi implementado e os resultados de testes foram apresentados mostrando um excelente comportamento.

Finalmente, apresentou-se como proposta de trabalho futuro uma estratégia de acionamento a ser estudada e implementada, visando a modelagem energética do veículo integrada ao ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10.1. BIBLIOGRAFIA

- [1] Andersen, M; Alvsten, B. **200W Low Cost Module Integrated Utility Interface for Modular Photovoltaic Energy Systems**. IEEE-IECON International Conf. on Ind. Electr. Cont. and Inst., vol I, pp. 572-577, Set 1995.
- [2] Bose, B.K.; Szczesny, P.M.; Steigerwald, R.L., **Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System**. IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Meeting, pp. 852-859, Set. 1984.
- [3] Chann, C.C., Chau, K.T., **An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles**, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol 44, no. 1, fev. 1997.
- [4] Enslin, J.H.R.; Snyman, D.B. **Combined Low-Cost, High-Efficient Inverter, Peak Power Tracker and Regulator for PV Applications**. IEEE Trans. on Power Electronics, vol 6, pp. 73-82, Jan. 1991.
- [5] Evans, P.D; Brown, D.. **Simulation of Brushless DC Drives**. IEE Proceedings, Vol 137, Pt. B, no 5, pp. 299-308, Set. 1990.
- [5] Franceschetti, N.N.; Reis L.O.M.; Simões M.G. **Modelagem e Simulação da Transferência de Potência de um Sistema Fotovoltaico**. COBEP - 4º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Belo Horizonte, pp. 275-280, Dez. 1997.

- [7] Herrmann, U., Langer, H.G., Broeck, H.V.D., **Low Cost DC to AC Converter for Photovoltaic Power Conversion in Residential Applications**, IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 588-594, 1993.
- [8] Hilloowala, R.M.; Sharaf, A.S. **A Rule-Based Fuzzy Logic Controller for a PWM Inverter in Photo-Voltaic Energy Conversion Scheme**. IEEE Industrial Applications Society, pp. 762-769, Jan. 1992.
- [9] Midya, P.; Krein, P.T.; Turnbull, R.J.; Reppa, R.; Kimball, J. **Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications**. IEEE Power Electronics Specialists Conf., vol II, pp. 1710-1716, Jul. 1996.
- [10] Migliaro, M.W., **Considerations for Selecting and Sizing Batteries**, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-23, no.1, pp. 134-143, jan/fev. 1987.
- [11] Patterson, D.J.. **Electrical System Design for a Solar Powered Vehicle**, IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 618- 622, 1990.
- [12] Rajashekara, K., **History of Electric Vehicles in General Motors**, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30 no. 4, pp. 897-904, Jul/Ago. 1994.
- [13] Saada, J.B., Bodson, J.M., **Regenerative Braking Control of a Chopper-Fed DC Series Motor**. The European Power Electronics Association, pp.289-294, 1989.
- [14] Sakmann, W.H., **A Brushless DC Motor Controlled by a Microprocessor with Examples for a Three-Phase Motor**. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.IE-34, nº 3, pp. 339-344, Ago. 1987.
- [15] Salameh, Z.; Taylor, D.. **Step-up Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays**. Solar Energy, vol. 44, Nº 1, pp. 57-61, 1990.

- [16] Shimizu H., Harada J., Bland C., Kawakami K., Chan L., **Advanced Concepts in Electric Vehicle Design**, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 44 no. 1, pp. 14-18, fev. 1997.
- [17] Simões, M.G.; Franceschetti N.N.; Adamowski, J.C. **A Photovoltaic-Based Electric Vehicle Drive System**, ISATA - International Symposium on Automotive Technology e Automation, pp. 307-315, Jun. 1997.
- [18] Simoes, M.G.; Franceschetti N.N.; Adamowski, J.C.. **Drive System Control and Energy Management of a Solar Powered Electric Vehicle**. IEEE - Applied Power Electronics Conference., pp. 49-55, Anaheim, CA, Fev 1998.
- [19] Sullivan, C.R.; Powers, M.J. **A High Efficiency Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays in a Solar-Powered Race Vehicle**. IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 574-580, 1993
- [20] Teulings, W.J.A.; Marpinard, J.C.; Capel, A.; O'Sullivan, D. **A New Maximum Power Point Tracking System**. IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp 833-837, Jun. 1993.
- [21] Walraven, R.. **"Calculating the position of the sun"** Solar Energy, vol. 20, pp. 393-397, 1978
- [22] Wilson H.G., MacCready P.B., Kyle C.R., **Lessons of Sunracer**, Scientific American, pp. 70 76, Mar. 1989.
- [23] Wolf, S.M.M.; Enslin, J.H.R.. **Economical, PV Maximum Power Point Tracking Regulator With Simplistic Controller**. IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 581-587, Jun. 1993.
- [24] Crowder, Richard M.. **Electric Drives and Their Controls**, Oxford, Clarendon Press, (Oxford Science Publications),1995,

- [25] Hendershot, Jr. J.R; Miller, T.J.E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors**, Magna Physics Publications, 1994, (Oxford Science Publications)
- [26] Kyle, C.R. **Racing with the Sun** (The 1990 World Solar Challenge), Warrendale, Society of Automotive Engineers Inc.1991.
- [27] Rauschenbach, H.S. **Solar Cell Array Design Handbook: The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion**, Van. New York, Van Nostrand Reinhold Company. 1980.
- [28] Roche, D.M., Schinckel, A.E.T., Storey, J.W.V., Humphris, C.P., Guelden, M.R., **Speed of Light** (The 1996 World Solar Challenge), Photovoltaics Special Research Centre, Sydney, 1997.
- [29] Solar cells datasheet, Angewandte Solarenergie - ASE GmbH, 1996.

10.1. BIBLIOGRAFIAS RECOMENDADAS

- [1] Caricchi, F., Crescimbeni, F., Di Napoli, A., Marcheggiani, M., **Prototype of Electric Drive with Twin-Cooled Wheel Direct Drive Motors**. IEEE Power Electronics Specialists Conf., vol II, pp. 1926-1932, 1996.
- [2] Chen, G.H., Tseng, K.J., **Design of a Permanent-Magnet Direct-driven Wheel Motor Drive for Electric Vehicle**. IEEE Power Electronics Specialists Conf., vol II, pp. 1933-1939, 1996.
- [3] Eastham, J.F., Moghani, J.S., Magureanu, R., Kreindler, L., Sarca A., Giuclea R., Boghiu, D., **DSP Control of the Brushless PM Linear Motor**. ICEM Advanced Control, vol. III, pp. 24-29, 1994.
- [4] Ehsani M., Rahman K.M., Toliyat H.A., **Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles**. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 44, no. 1, pp. 19-27, fev. 1997.
- [5] Gross A.C., Kyle C.R., Malewicki D.J. **The Aerodynamics of Human-Powered Land Vehicles**, Scientific American, pp. 126 134, mês e ano.
- [6] Haan, S.W.H de. **“Power electronics for renewable energy systems: state of the art, trends and challenges,”** PEMC Invited Paper, vol. 3, pp. 31-38, Budapest, 1996.
- [7] Hefner Jr. A.R. **An Investigation of the Drive Circuit Requeriments for the Power Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)**, IEEE Tran. on Power Electronics, vol. 6. No 2, Abr. 1991.
- [8] Kassakian, J.G., **The Future of Power Electronics in Advanced Automotive Electrical Systems**, IEEE Power Electronics Specialists Conf., pp. 7-14, 1996.

- [9] Kempkes, J., Sattler, K., **Comparison of Running at Different Concepts of Controlling Brushless DC-Motors**. The European Power Electronics Association, vol V, pp.15-20, 1993.
- [10] Kim, Y.H., Ha, H.D., **Design of Interface Circuits with Electrical Battery Models**, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol 44, no. 1 pp. 81-86, feb. 1997.
- [11] Low, T.S.; Tseng, K.J.; Lee, T.H.; Lim, K.W.; Lock, K.S.. **Strategy for the Instantaneous Torque Control of Permanent-Magnet Brushless DC Drives**. IEE Proceedings, vol. 147, Pt B. n° 6, pp. 355-363, Nov. 1990.
- [12] Profumo, F., Zhang, Z., Tenconi, A., **Axial Flux Machines Drives: "A New Viable Solution for Electric Cars"**. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 44 no. 1, pp. 39-45, fev. 1997.
- [13] Rahman, M.A., Qin R., **A Permanent Magnet Hysteresis Hybrid Synchronous Motor for Electric Vehicles**. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 44, no. 1, pp. 46-53, fev. 1997.
- [14] Terashima, M., Ashikaga, T., Mizuno T., Natori K., Fujiwara N., Yada M., **Novel Motors and Controllers for High-Performance Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors**. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.44, no. 1, pp. 29-38, fev. 1997.
- [15] Horowitz, P., Hill, W., **The Art of Electronics**. Cambridge University Press, Cambridge, second edition, 1989
- [16] Kaue, L.K.N; Bonesio, M.C.M.; Villela, M.C.O. **Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses**. Escola Politécnica da USP, 1991 (Serviço de Bibliotecas)
- [17] Rawlings, J.O.. **"Applied Regression Analysis"** Wadsworth & Brooks/Cole, Belmont, CA, 1988.

[18] User's Guide of The Student Edition of MATLAB. New Jersey, Printice Hall, 1995.

[19] Embedded Control Handbook, Microchip Technology, 1994

[20] 68HC11 Reference Manual, Motorola, 1991

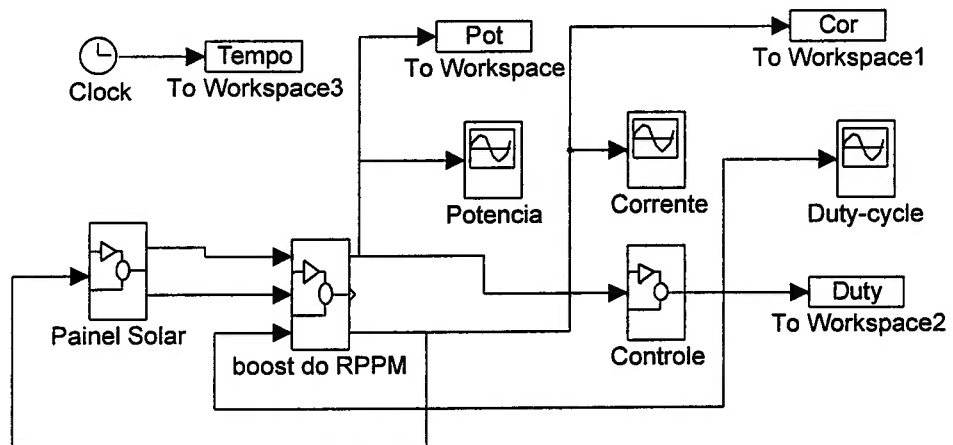
[21] The TTL Data Book, volume 2, Texas Instruments, 1985.

[22] General Purpose Linear Devices (databook), National Semiconductor, 1989.

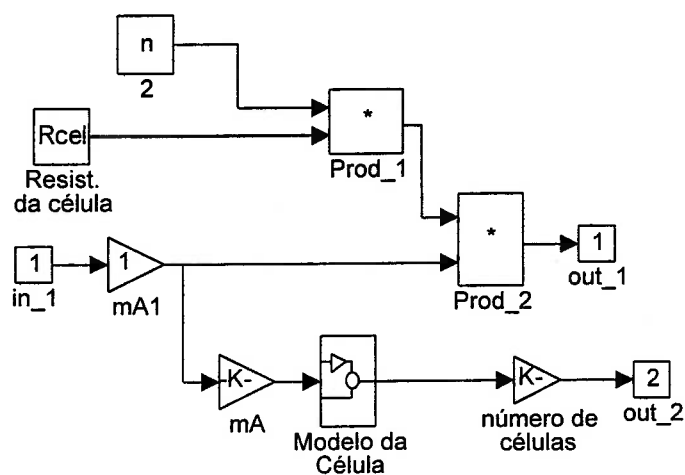
APÊNDICE A

IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

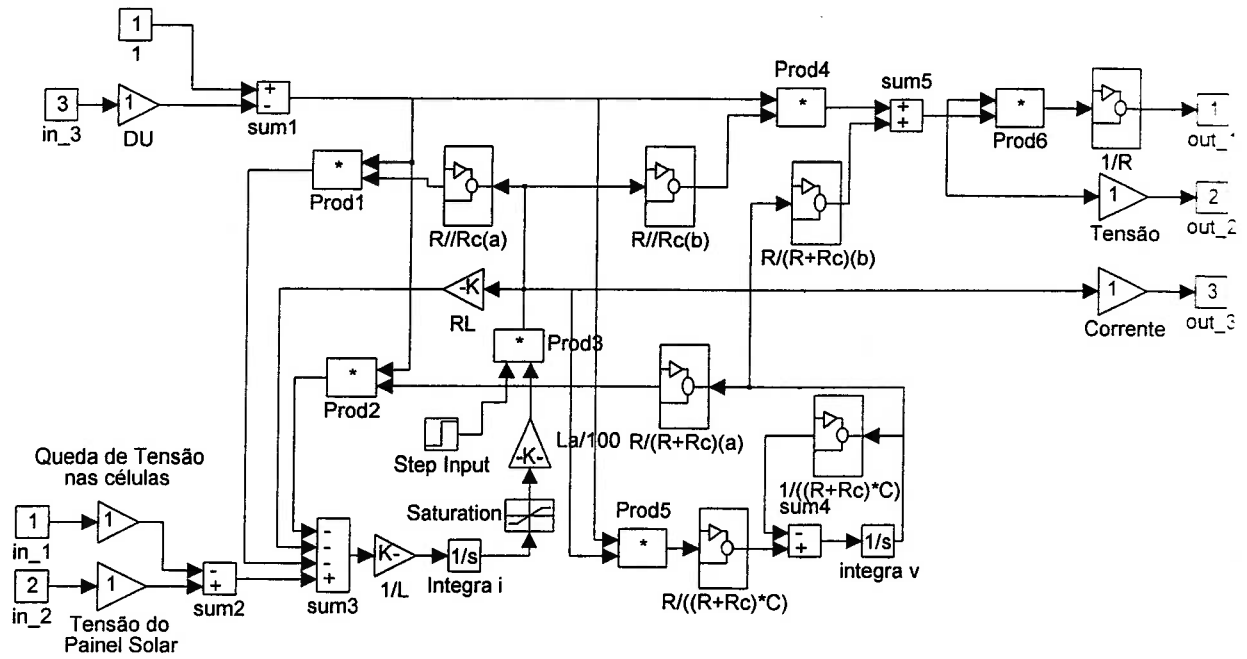
Este apêndice apresenta os blocos do modelo do painel solar, conversor boost e malha de controle do sistema fotovoltaico.



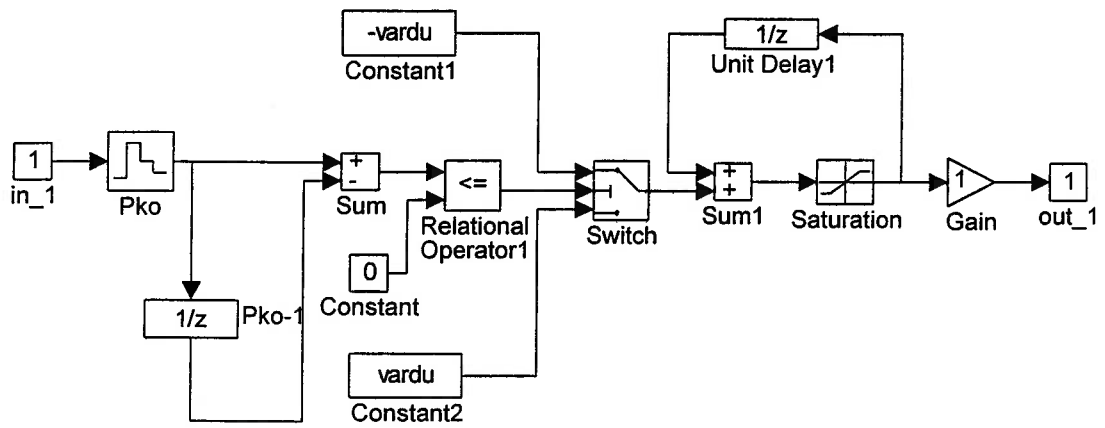
Apêndice A1. Sistema Fotovoltaico



Apêndice A2. Modelo do Painel Solar



Apêndice A3. Boost do RPPM

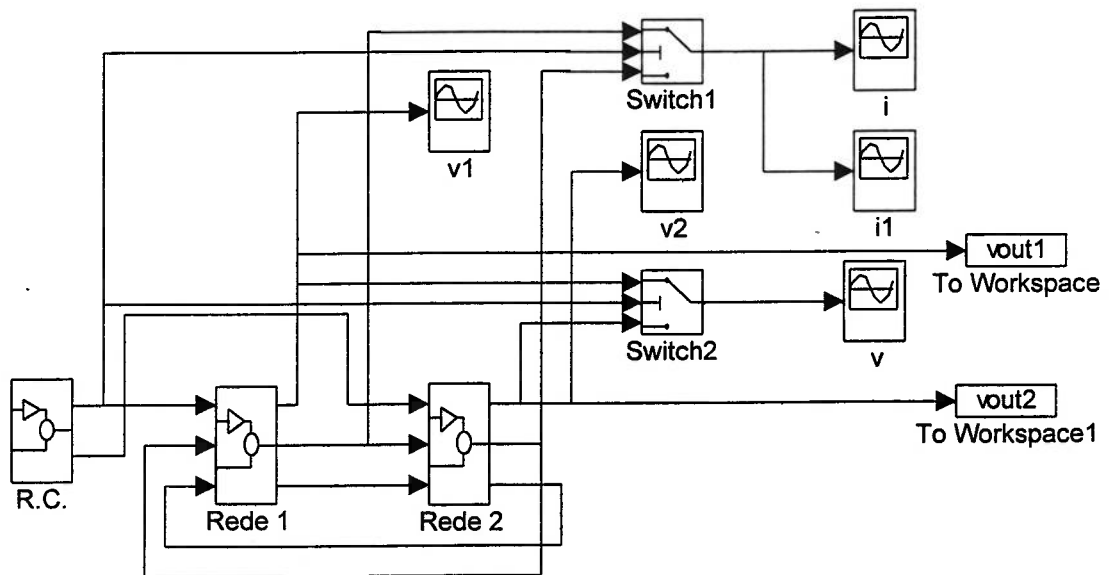


Apêndice A4. Malha de controle

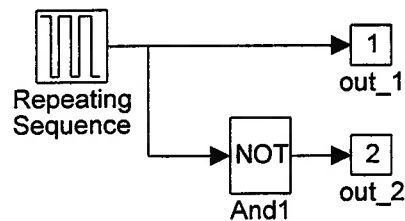
APÊNDICE B

IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK DO ELEVADOR DE TENSÃO REGENERATIVO

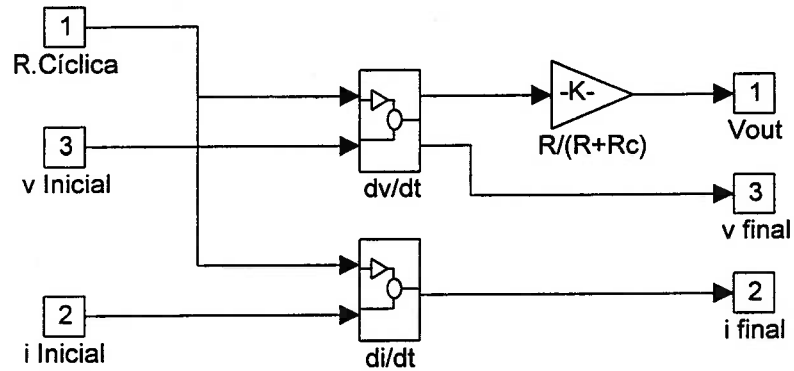
Este apêndice apresenta os blocos do modelo do sistema elevador de tensão regenerativo.



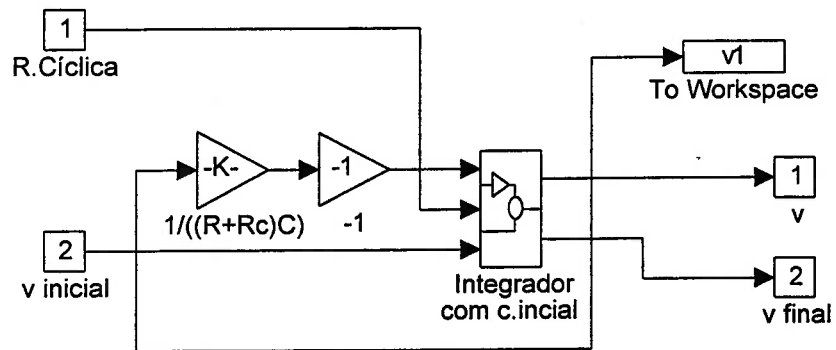
Apêndice B1. Elevador de tensão regenerativo.



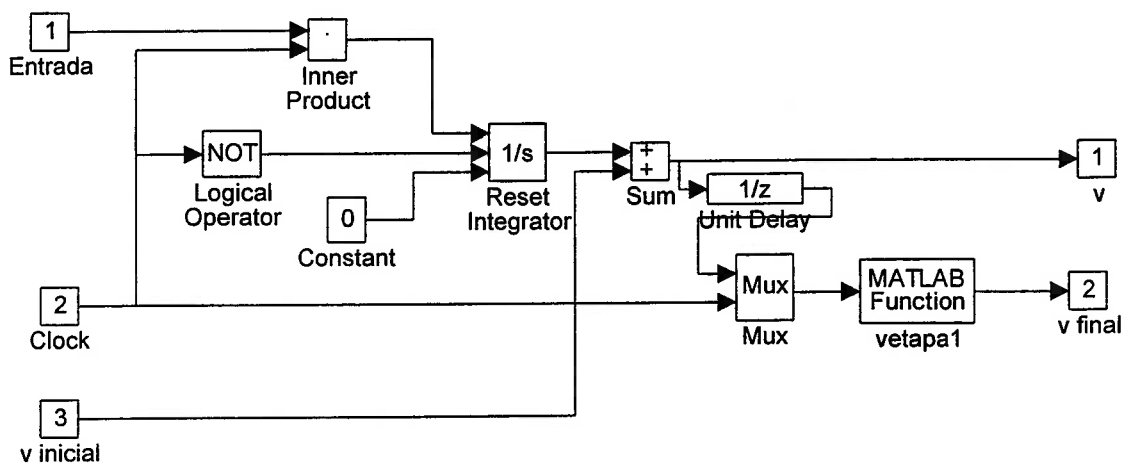
Apêndice B2. Gerador da razão cíclica.



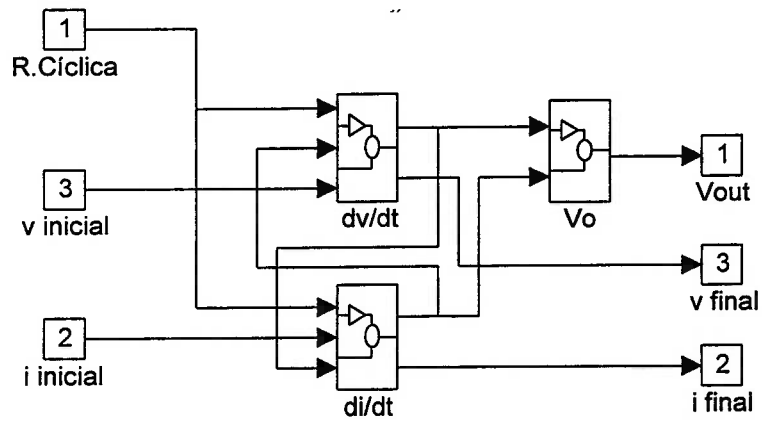
Apêndice B3. Primeiro estágio de operação do conversor "boost".



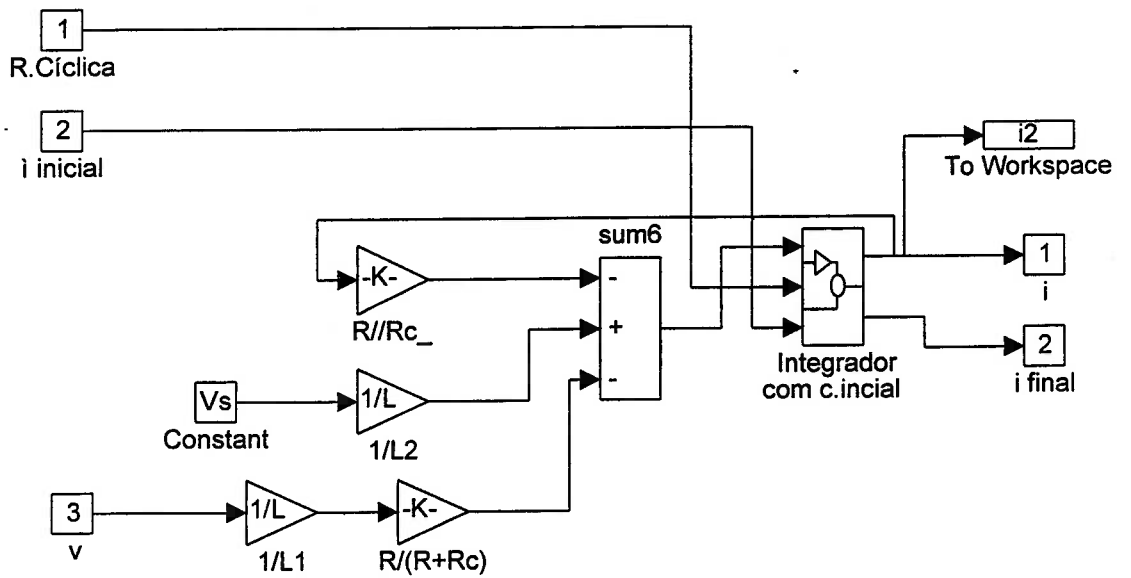
Apêndice B3. Tensão no capacitor durante primeiro estágio.



Apêndice B4. Integrador do capacitor com possibilidade de impor condição inicial.



Apêndice B5. Segundo estágio de operação do conversor "boost".

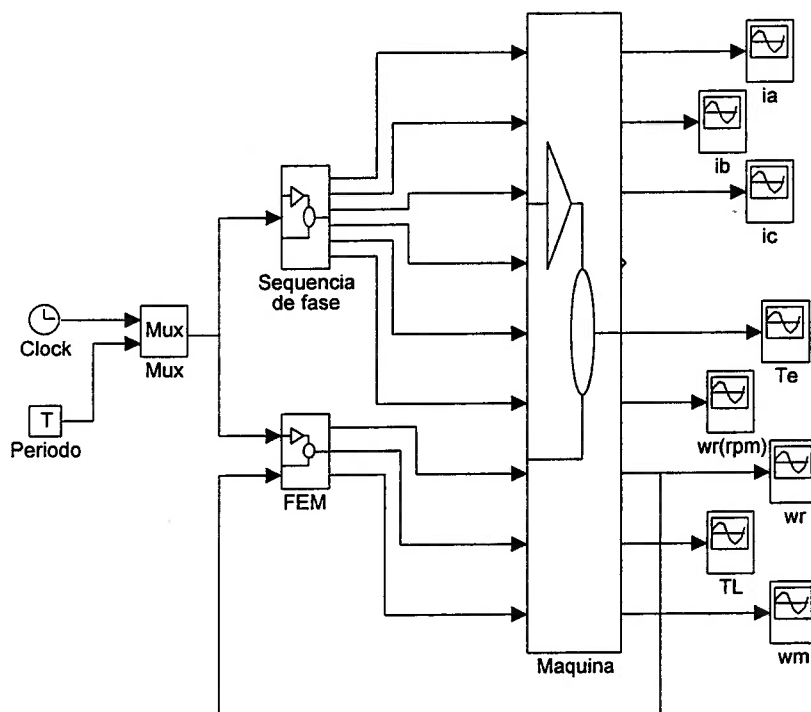


Apêndice B6. Corrente no indutor durante operação do segundo estágio.

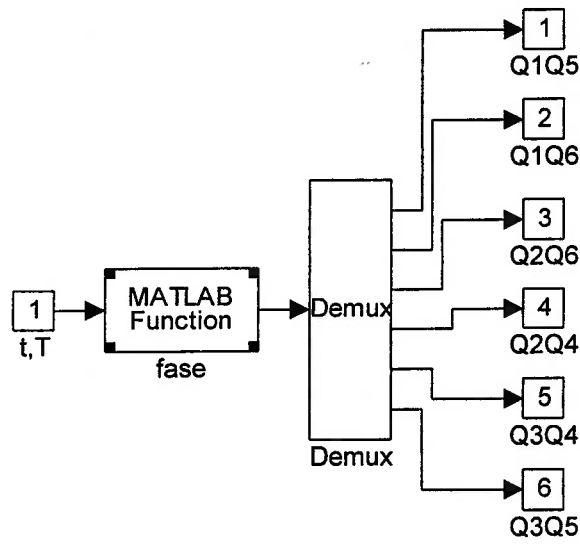
APÊNDICE C

IMPLEMENTAÇÃO NO SIMULINK DO SISTEMA DE
ACIONAMENTO E CONTROLE

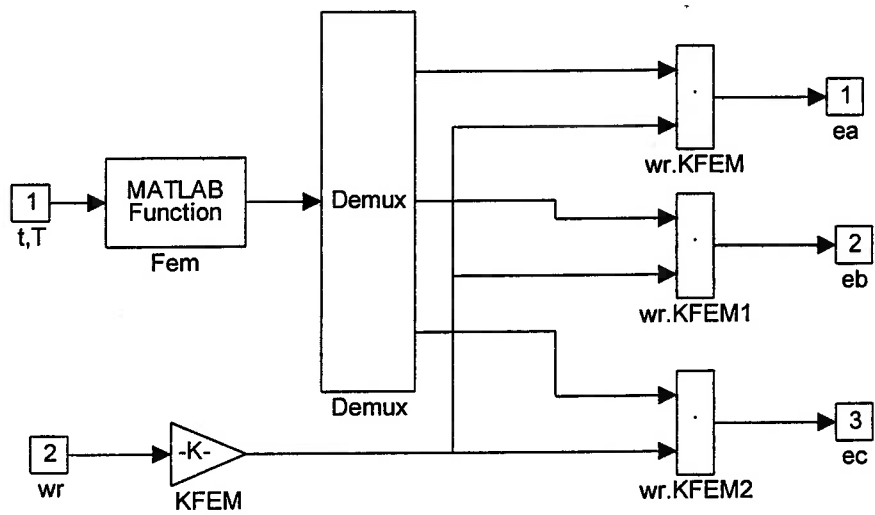
Este apêndice apresenta os blocos do modelo do motor Brushless e seu sistema de acionamento e controle.



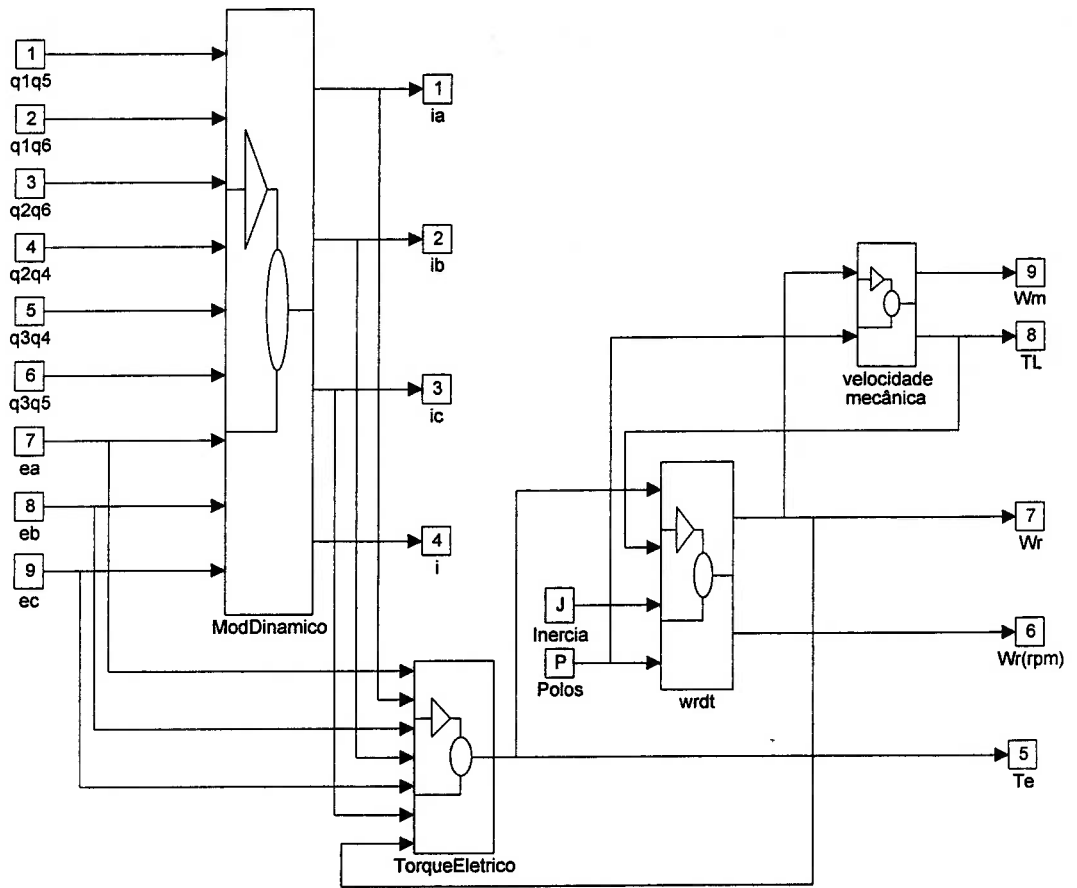
Apêndice C1. Modelo do motor brushlees com o sistema de acionamento acoplado.



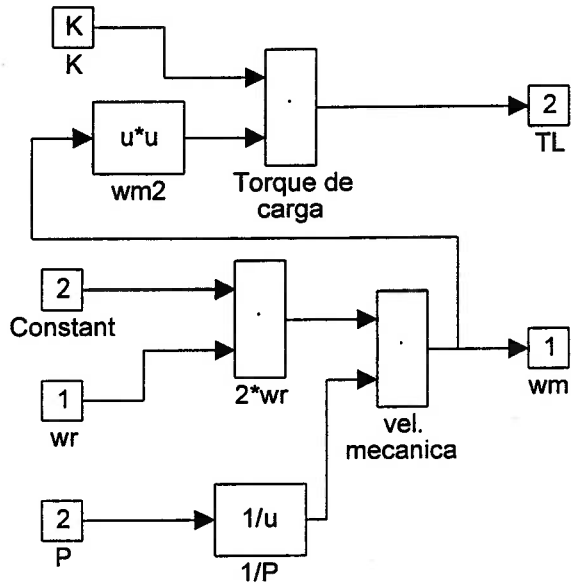
Apêndice C2. Bloco gerador da seqüencia de fase do acionamento.



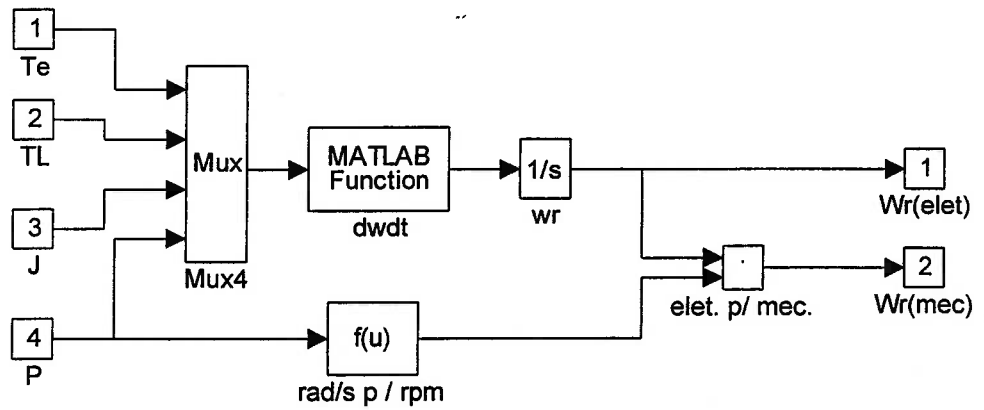
Apêndice C3. Bloco gerador das forças contraeletromotriz.



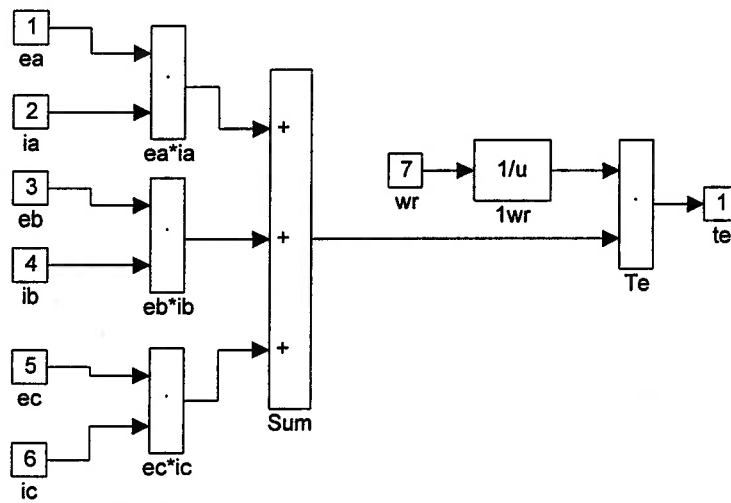
Apêndice C4. Bloco que representa a máquina brushless.



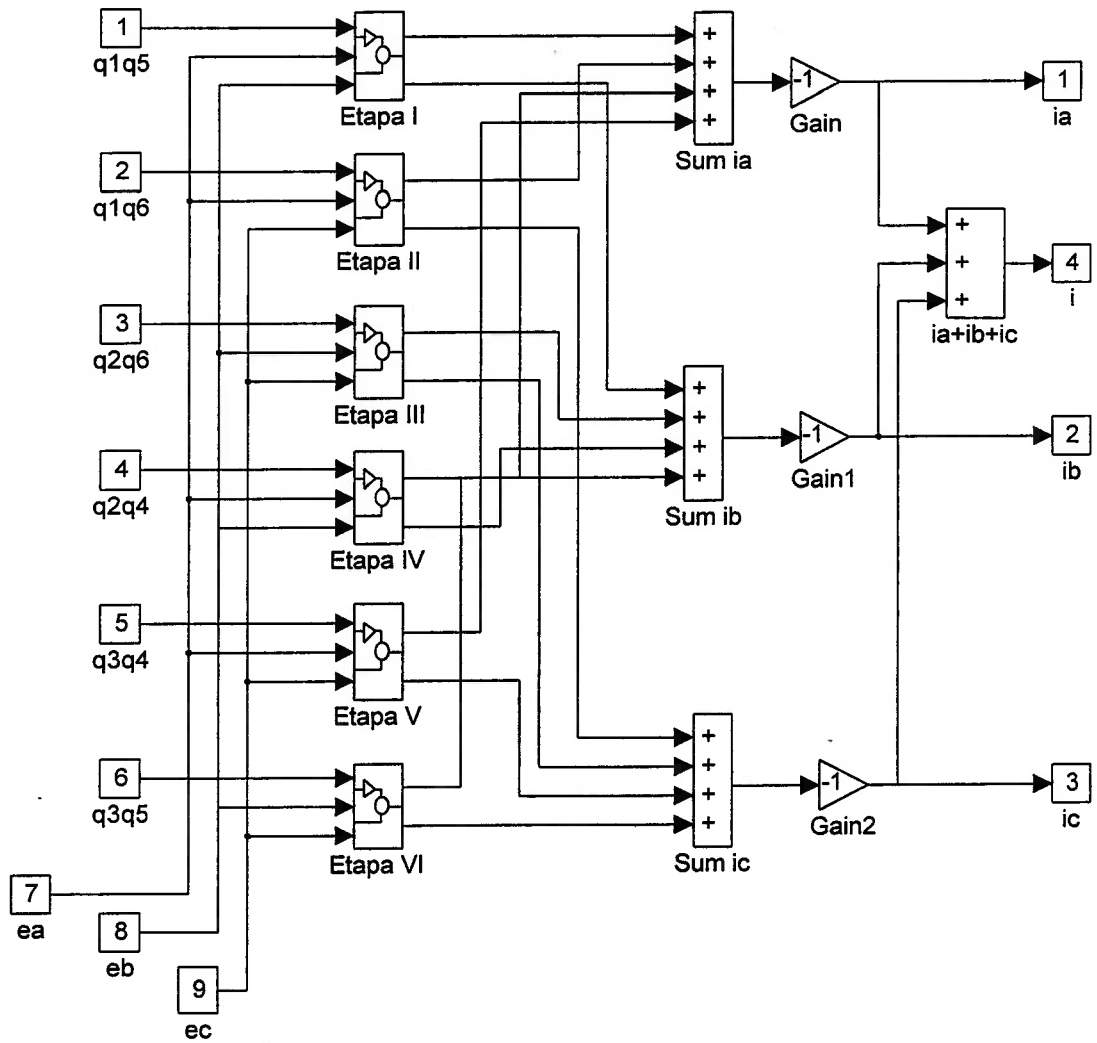
Apêndice C5. Bloco de torque de carga e de velocidade.



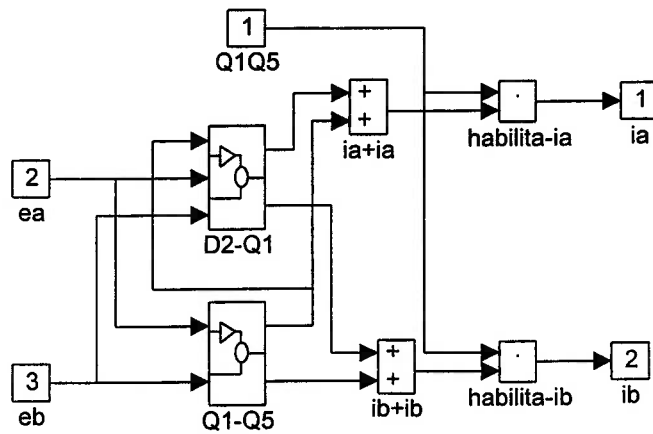
Apêndice C6. Bloco gerador da velocidade elétrica.



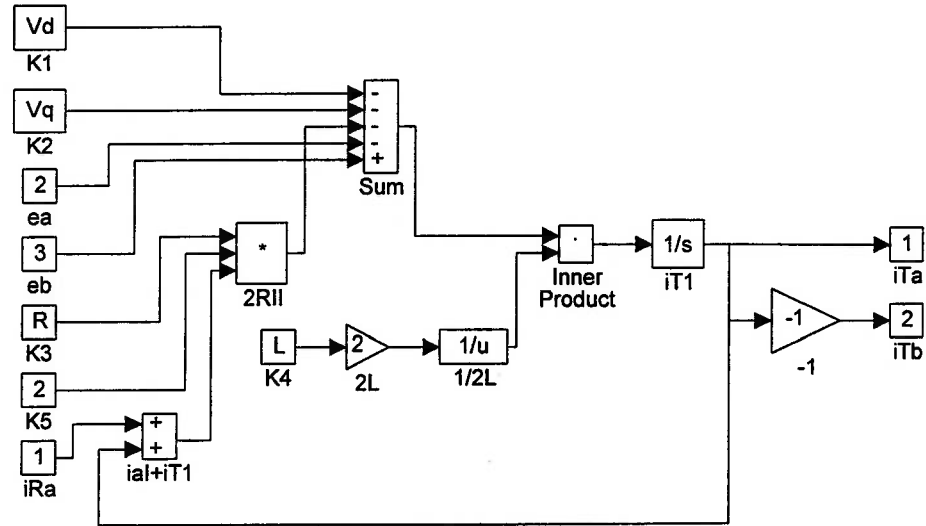
Apêndice C7. Bloco que calcula o torque elétrico.



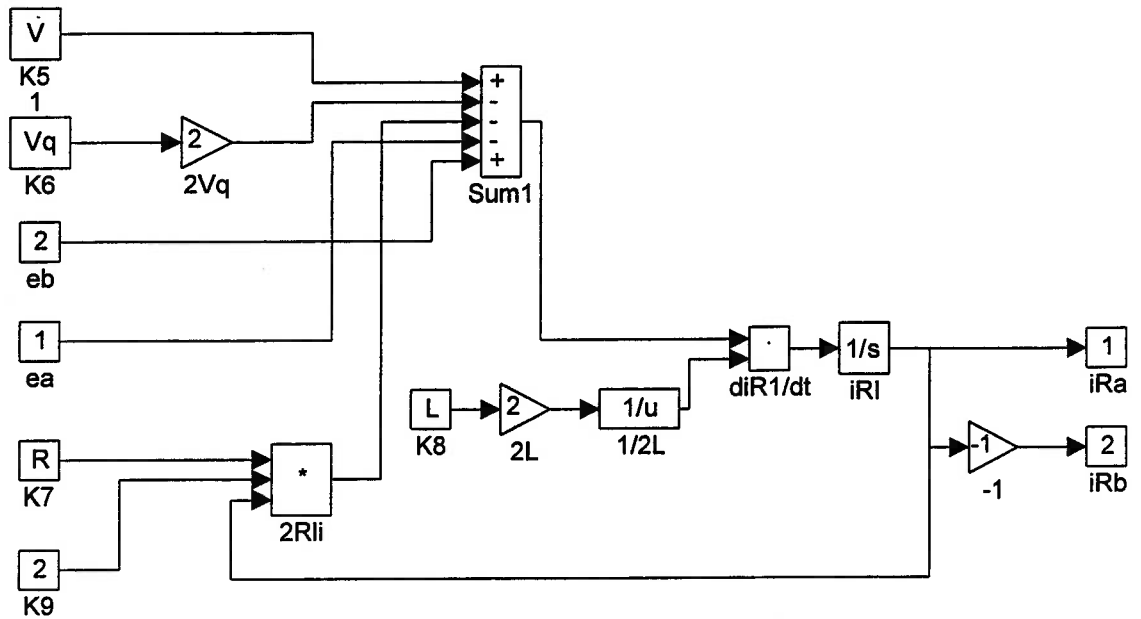
Apêndice C8. Bloco com todas as equações diferenciais.



Apêndice C9. Bloco que representa o período e transitório 1.



Apêndice C10. Bloco do transitório 1.



Apêndice C11. Bloco do período 1.

APÊNDICE D

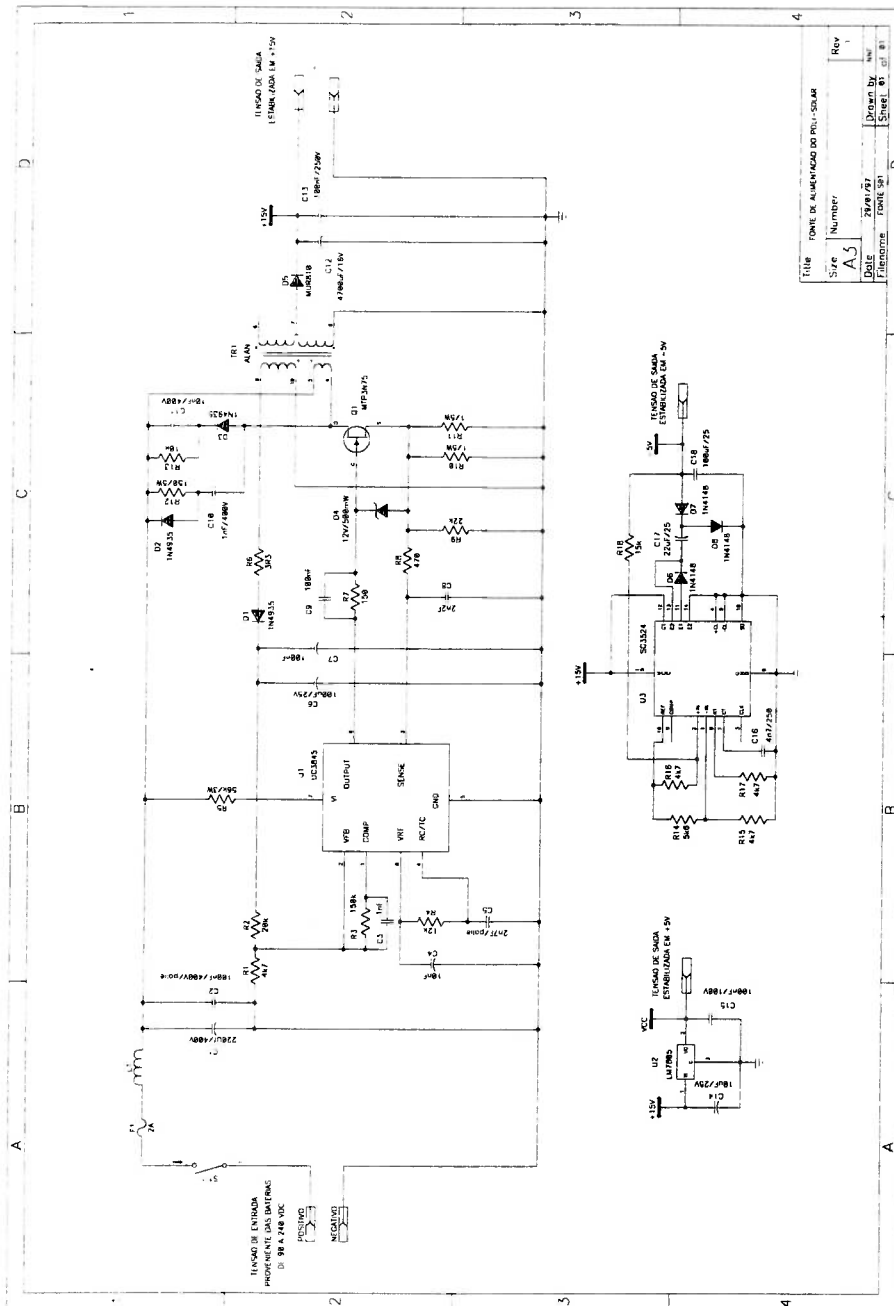
ESQUEMAS ELÉTRICOS DO POLI-SOLAR

Este apêndice apresenta os esquemas elétricos dos circuitos eletrônicos implementados no Poli-Solar.

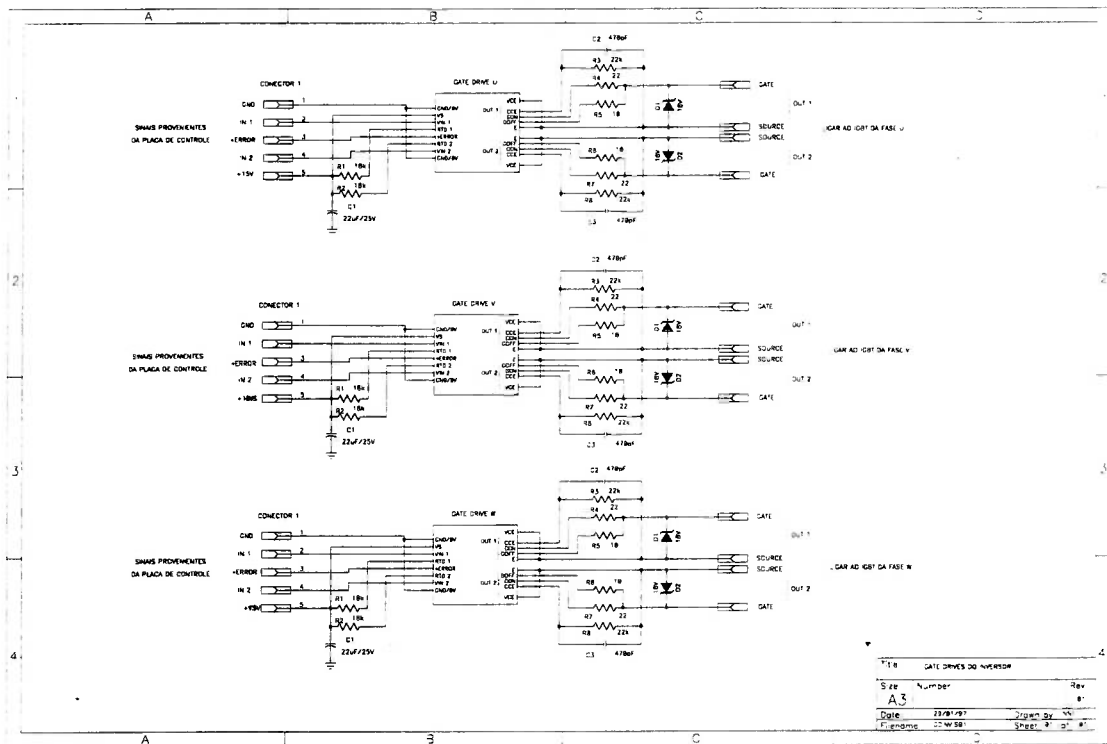
APÊNDICE D

ESQUEMAS ELÉTRICOS DO POLI-SOLAR

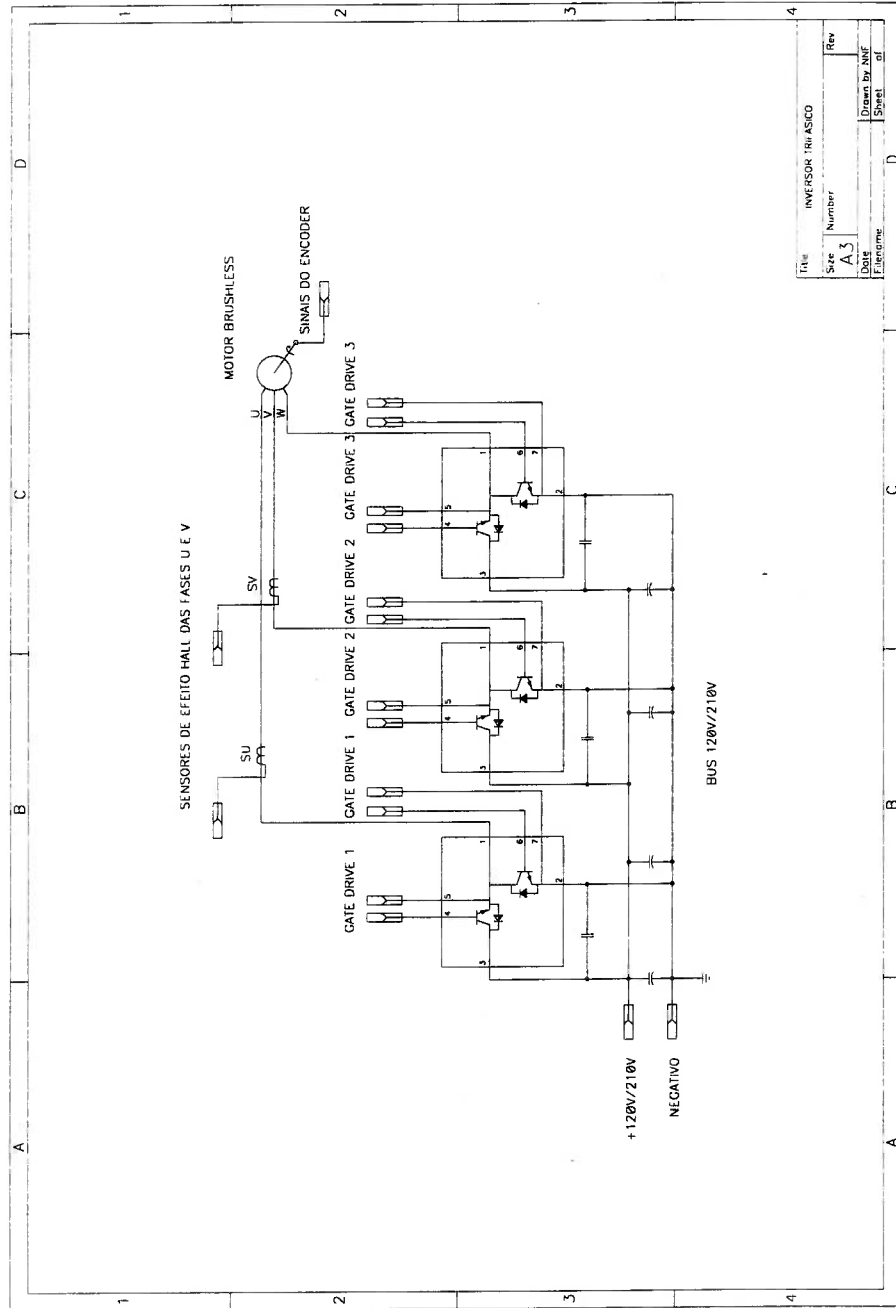
Este apêndice apresenta os esquemas elétricos dos circuitos eletrônicos implementados no Poli-Solar.



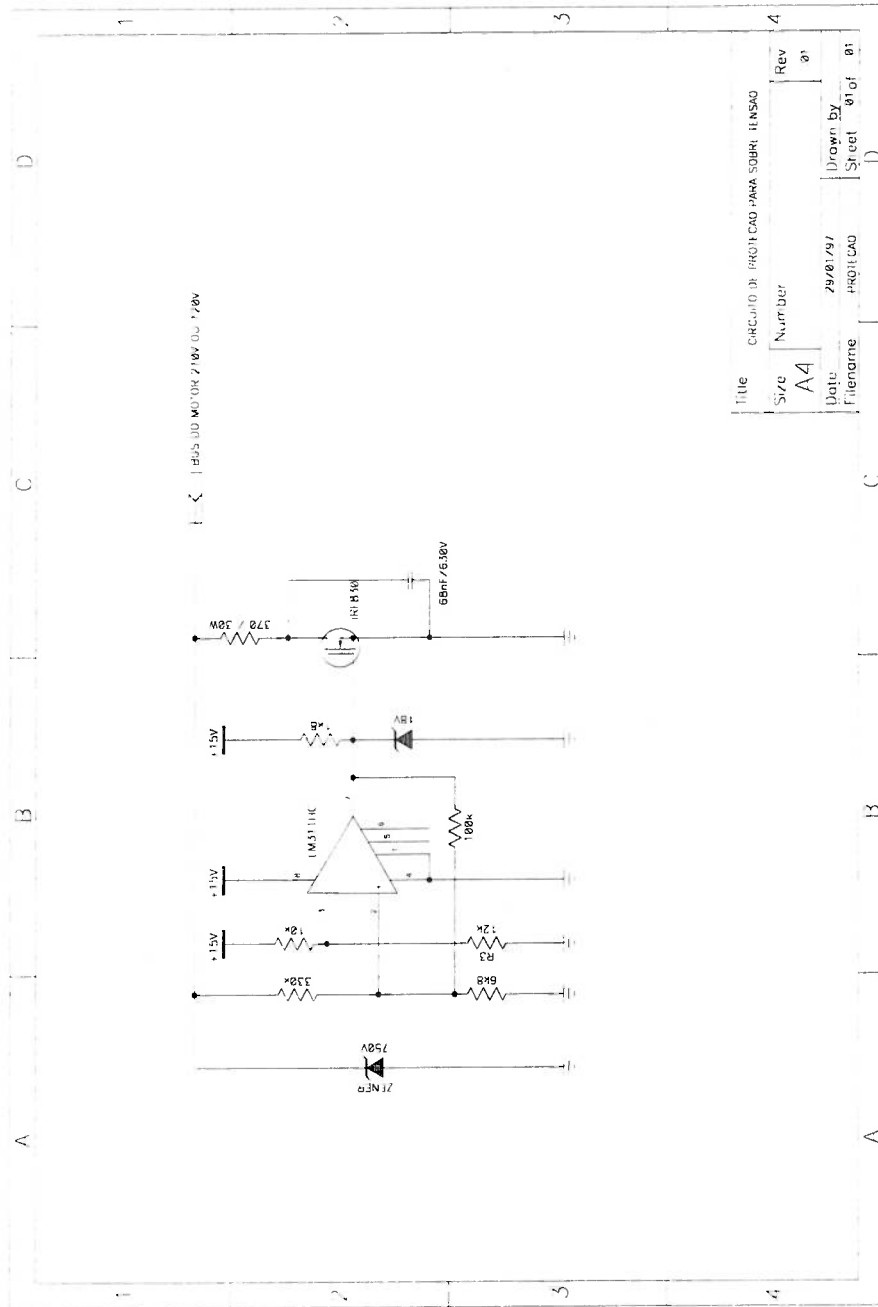
Apêndice D1. Esquema elétrico da fonte de alimentação do sistema.



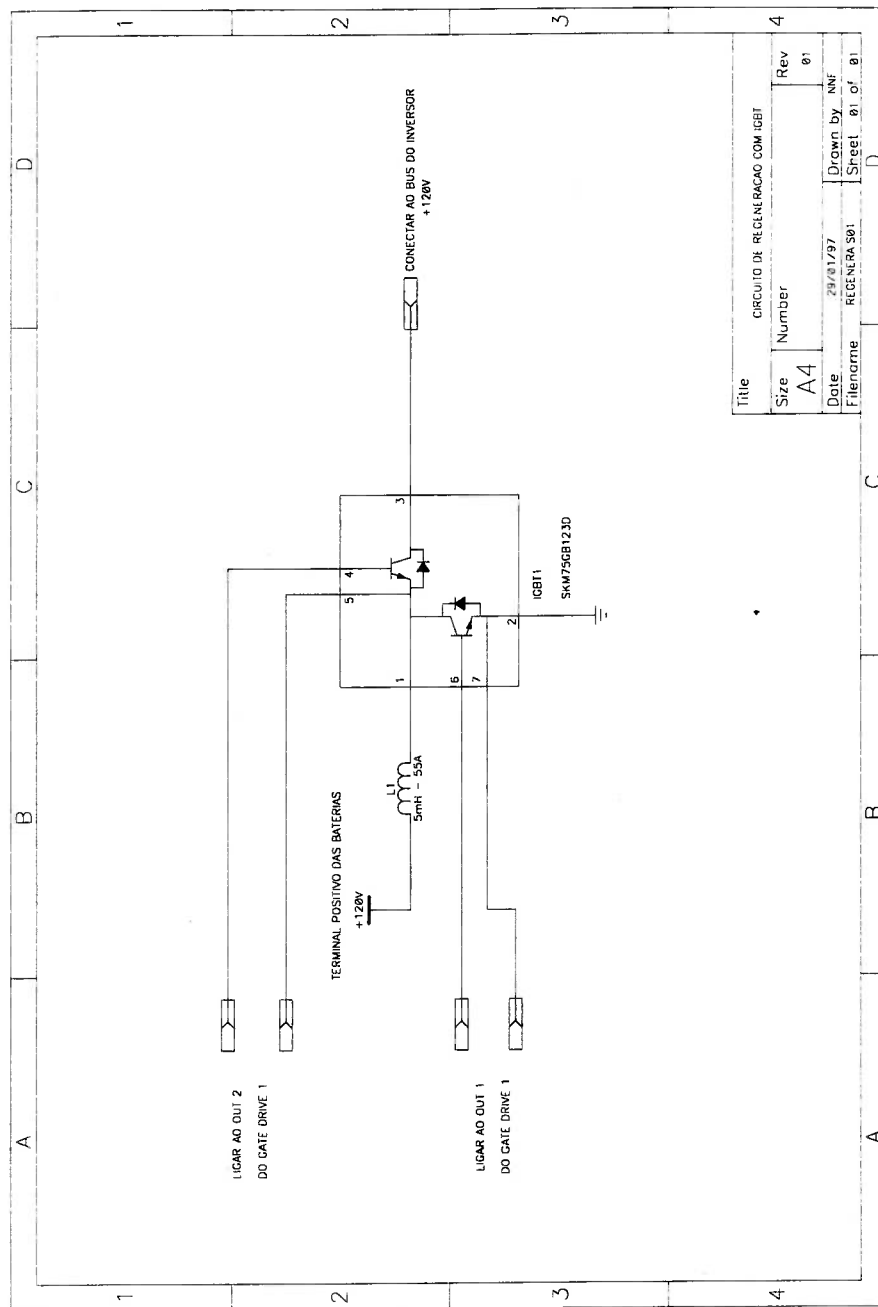
Apêndice D2. Esquema elétrico dos “gate drives” do Inversor.



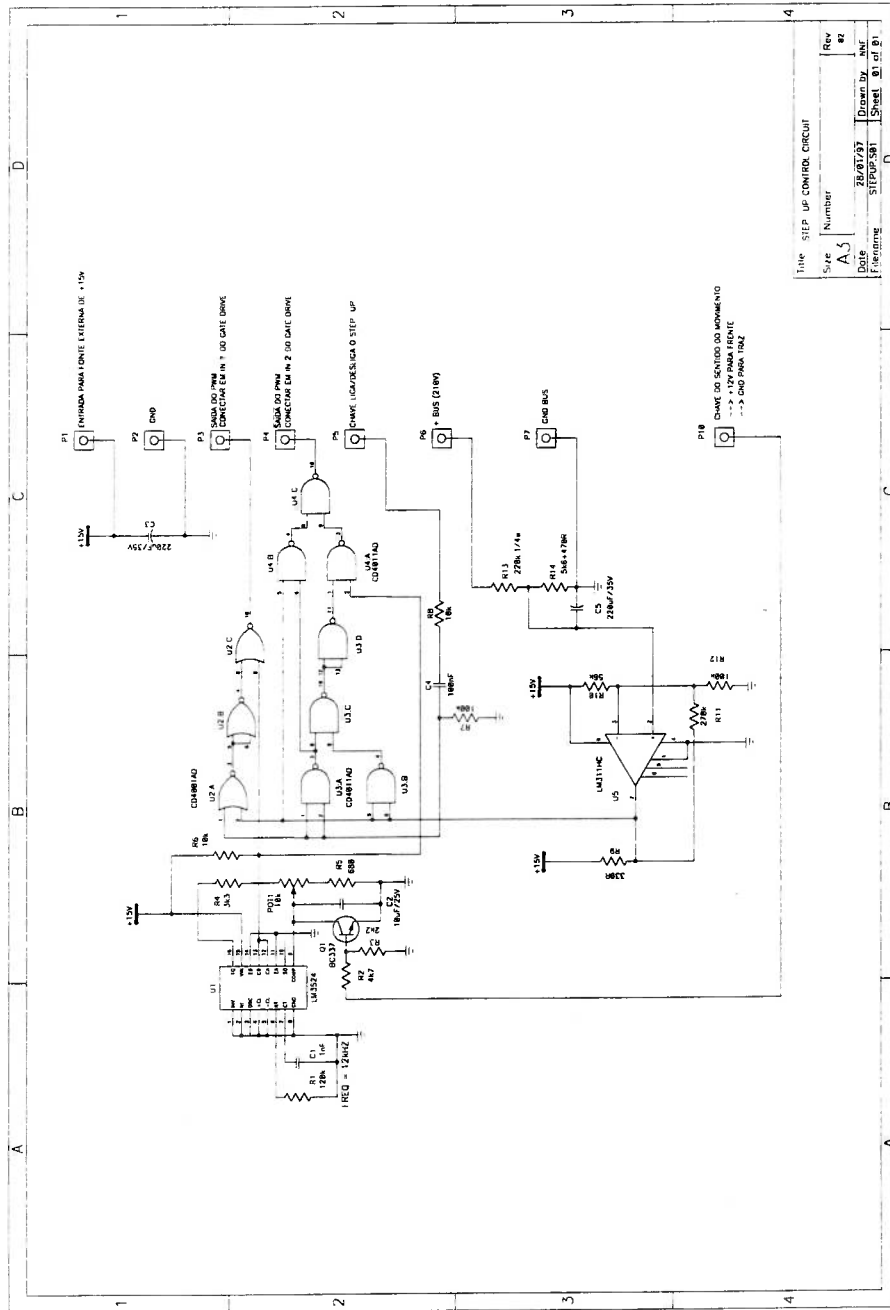
Apêndice D3. Esquema elétrico do inversor trifásico.



Apêndice D4. Esquema elétrico do freio dinâmico com histerese.

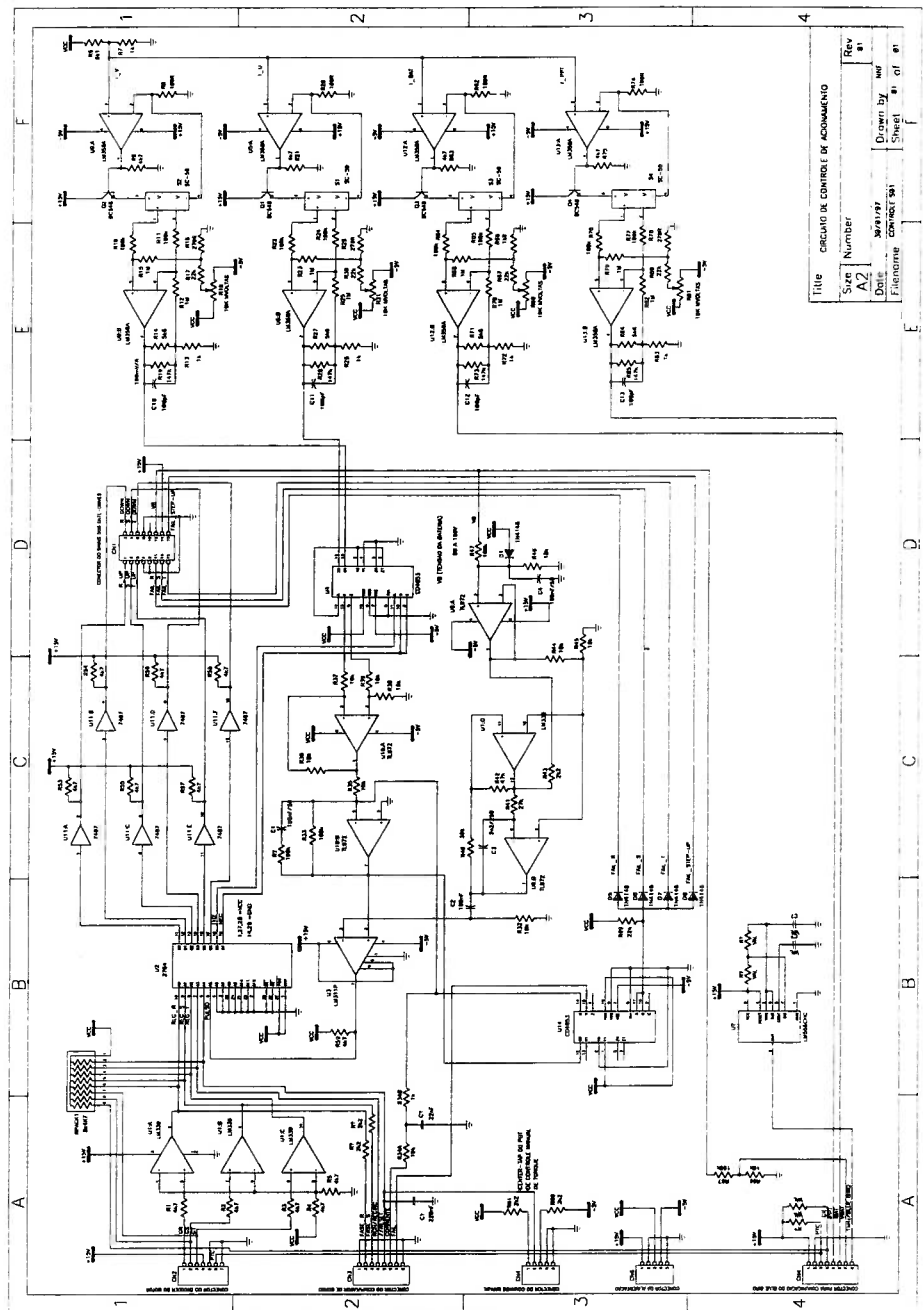


Apêndice D5. Esquema elétrico do circuito de potência do elevador de tensão regenerativo.

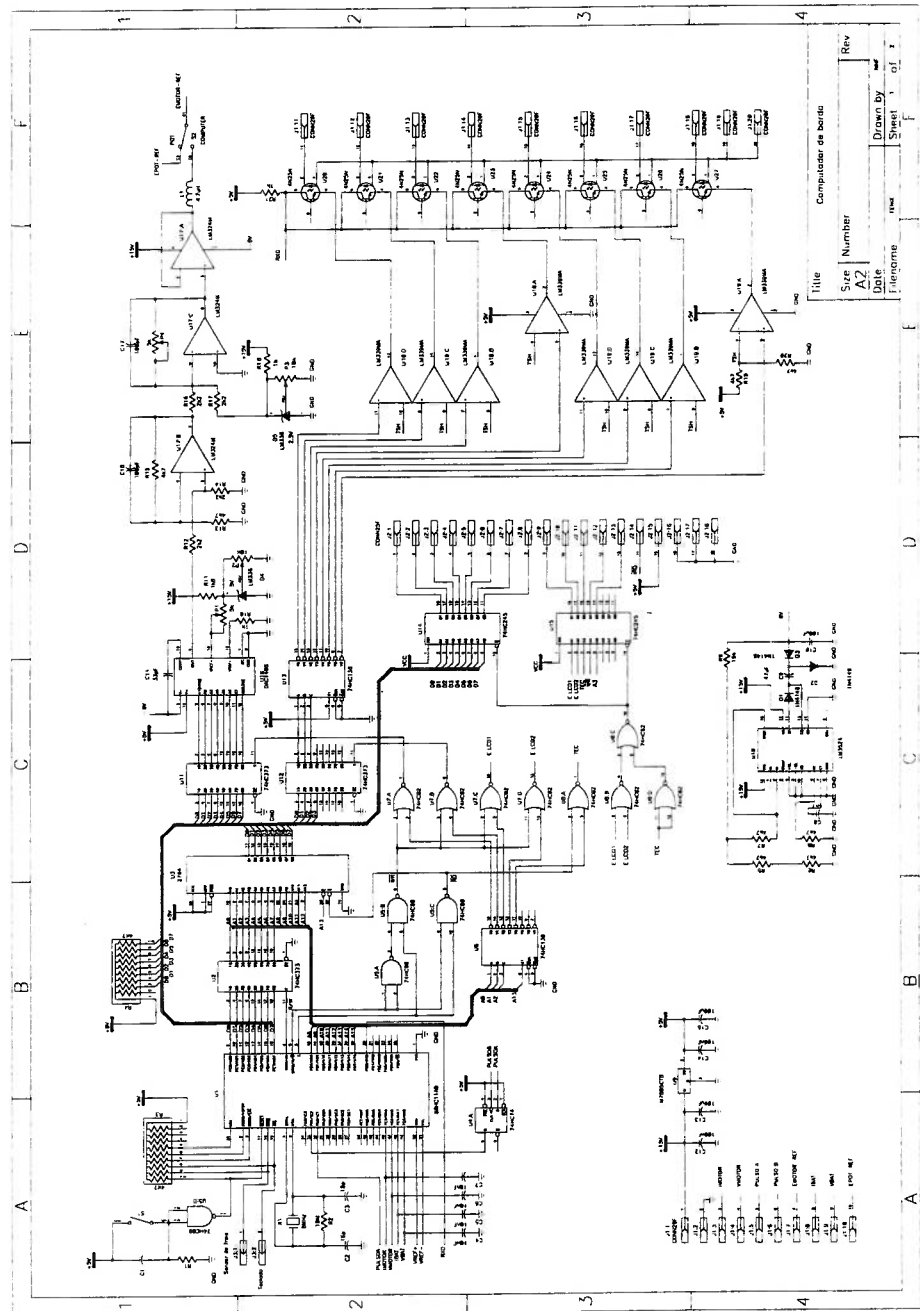


Title: STEP UP CONTROL CIRCUIT	
Size: A3	Number: 82
Date: 28/07/97	Drawn by: DMF
File name: STEPUP.SB1	Sheet: 01 of 01

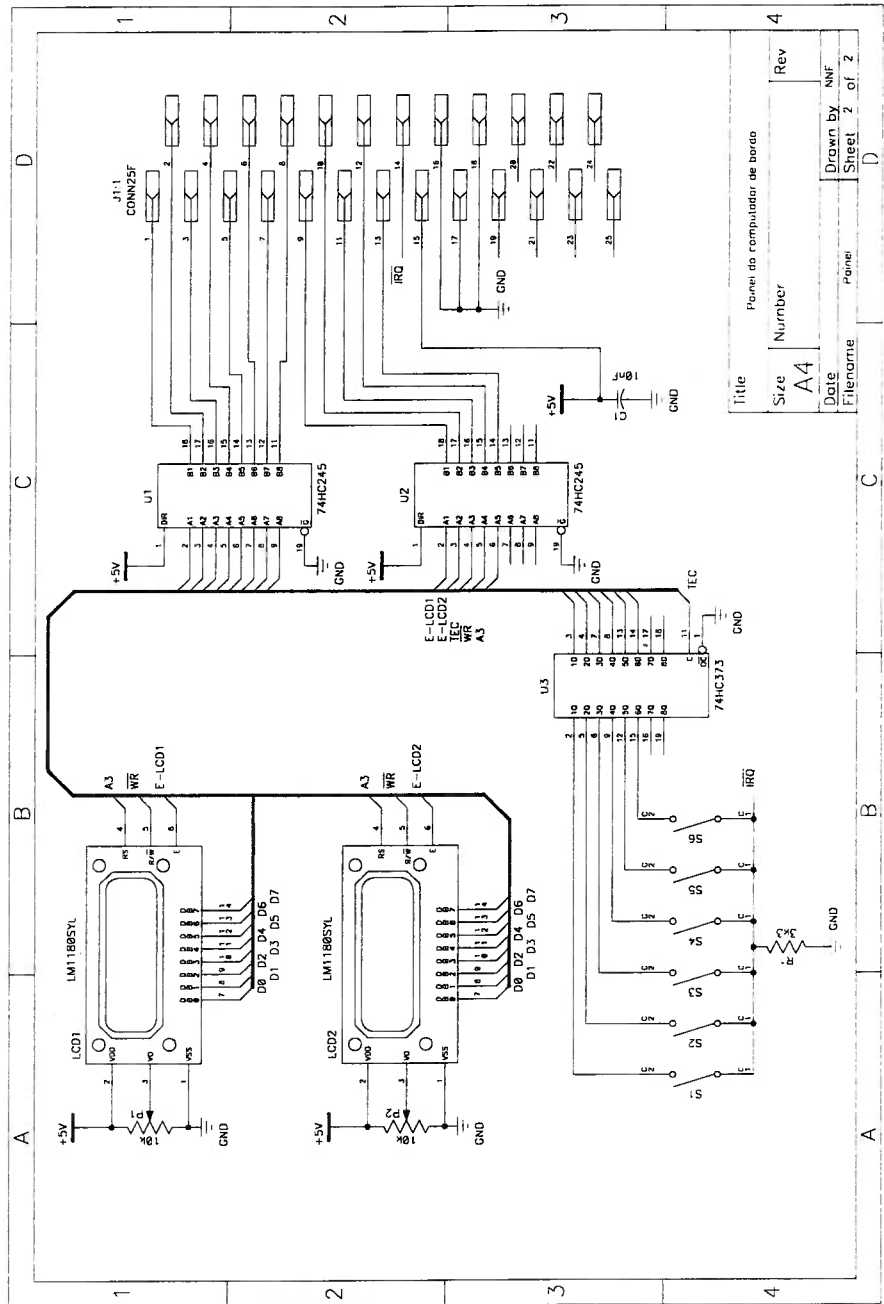
Apêndice D6. Esquema elétrico do circuito de controle de tensão regenerativo.



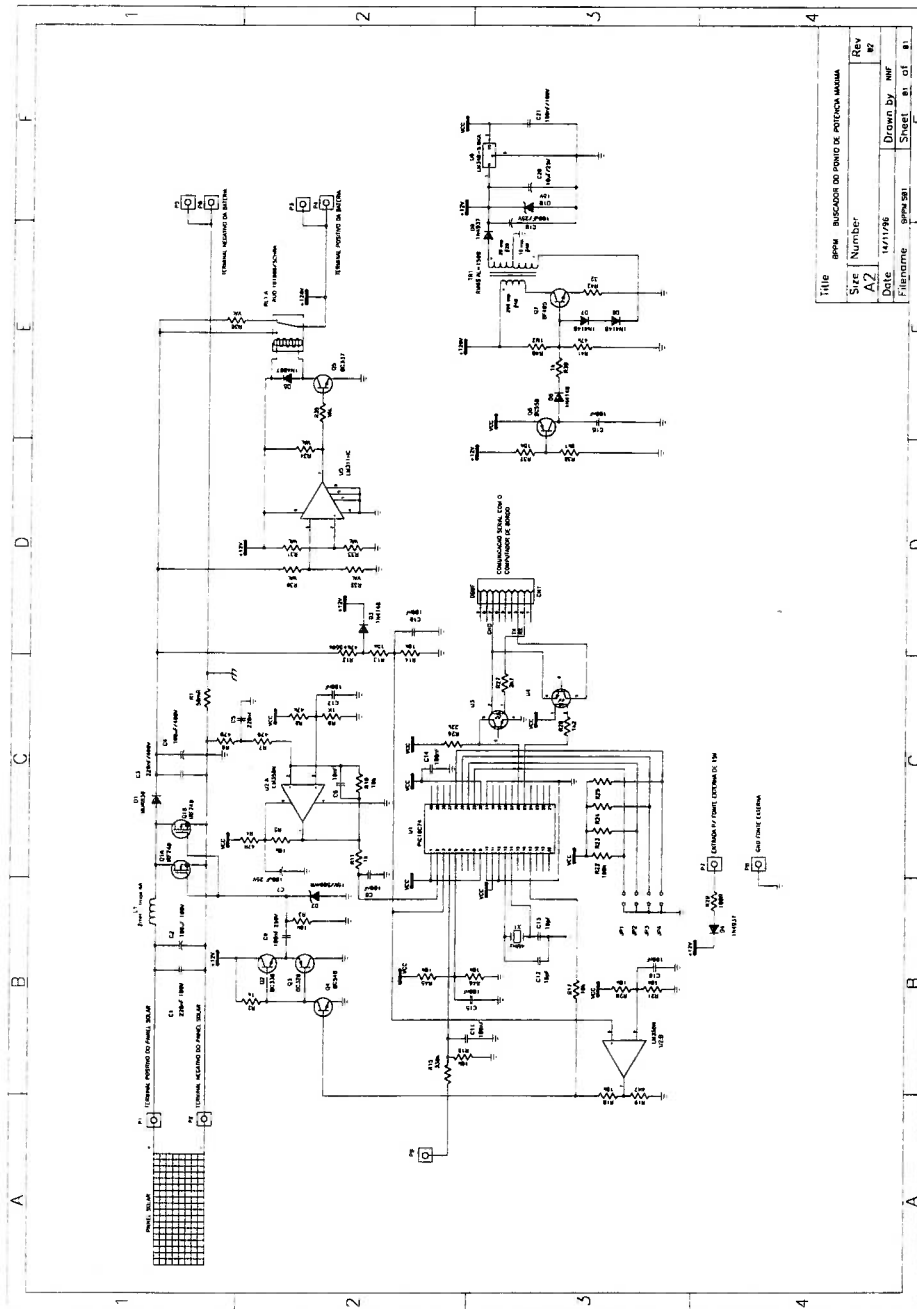
Apêndice D7. Esquema elétrico do circuito de controle do acionamento.



Apêndice D8. Esquema elétrico do computador de bordo.



Apêndice D9. Esquema elétrico do painel do computador de bordo.



Apêndice D10. Esquema elétrico do RPPM.