



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO



ESCOLA DE MINAS

EDUARDO FILIPE PEREIRA MACIEL

**ACIONAMENTO DE UM MOTOR CC ALIMENTADO POR PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS BASEADO EM TÉCNICAS MPPT**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2017

EDUARDO FILIPE PEREIRA MACIEL

**ACIONAMENTO DE UM MOTOR CC ALIMENTADO POR PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS BASEADO EM TÉCNICAS MPPT**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha

Ouro Preto

Escola de Minas – UFOP

Agosto/2017

M152a Maciel, Eduardo Filipe Pereira.
Acionamento de um motor CC alimentado por painéis fotovoltaicos baseado em técnicas MPPT [manuscrito] / Eduardo Filipe Pereira Maciel. - 2017.

61f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.

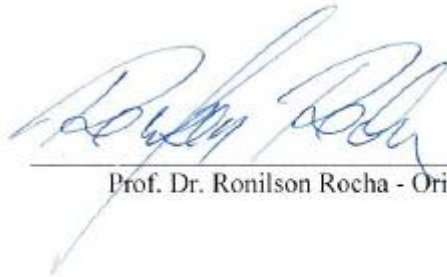
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Rastreamento automático. 3. Controle incremental de movimento. I. Rocha, Ronilson. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 04 de setembro de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Ronilson Rocha - Orientador



Prof. M. Sc. João Carlos Vilela de Castro - Professor Convidado



Vinicius Marinho Silva - Professor Substituto Convidado

“If you can't fly then run, if you can't run then walk, if you can't walk then crawl, but whatever you do you have to keep moving forward.”

Martin Luther King Jr.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado me iluminando.

Aos meus pais e minha irmã por todo apoio, carinho, cobranças e dedicação que sem dúvida foram essenciais para me trazer até aqui.

Aos meus familiares, pelo exemplo e companheirismo.

A UFOP e a gloriosa Escola de Minas, em especial ao professor Ronilson Rocha, por todo aprendizado, paciência, orientação e oportunidades.

A CAPES, pela oportunidade que me foi concedida de poder fazer um intercâmbio que sem dúvida alguma me fez enxergar o mundo com outros olhos e me fez crescer tanto pessoalmente quanto profissionalmente.

A toda equipe de Automação da VALE pelas oportunidades e ensinamentos.

Aos meus grandes amigos e irmãos de Mariana, Ouro Preto (Automação 10.2), Ciências sem Fronteiras e em especial da Republica Taturrodano, que me mostraram o quão importante são os amigos em nossas vidas.

A todos que de alguma forma contribuíram para esta conquista.

RESUMO

Energia elétrica é um tema que está sempre em discussão, principalmente para encontrar formas limpas, baratas e eficazes para geração da mesma. Neste trabalho apresenta-se a proposta do acionamento de um motor CC alimentado por painéis fotovoltaicos, baseado em técnicas máxima potência. O módulo proposto busca monitorar um painel fotovoltaico, que varia sua geração de energia elétrica de acordo com a variação das condições ambientais ou de carga, com a intenção de regular, através da variação de um conversor de potência, a quantidade de corrente e tensão que será enviada a carga, buscando sempre que o painel trabalhe em seu ponto de máxima potência. Para isso foi implementado duas técnicas de rastreamento de máxima potência – MPPT (Perturbar e Observar – P&O e Condutância Incremental), implementadas no software NI Labview, utilizando o microcontrolador Arduino UNO para aquisição e geração do sinal de controle. Ao final da implementação foi feito diversos testes para comparar as duas técnicas e descobrir qual das duas seriam eficaz e possuiriam o melhor custo benefício.

PALAVRAS-CHAVES: Painel Fotovoltaico, MPPT, Labview, Arduino, P&O, Condutância Incremental

ABSTRACT

Electricity is a subject that is always in discussion and the main subject involving it is to find clean, cheap and efficient way to produce it. This paper presents the starter of a DC motor which is power supplied by photovoltaics panels based on maximum power track technics. The proposed module watches the differences of power generation from the photovoltaic panel, which happens because of climate or load changes, and tries to regulate the quantity of current and tension that was given to the load, using an electronic switch in intension to find the maximum power point. Two different Maximum Power Point Tracking - MPPT technics were implemented using LabVIEW NI and Arduino UNO (Perturb and Observe and Incremental Conductance) and at the end, the technics were compared in order to find out which one was more efficient and best to be implemented.

KEYWORDS: Photovoltaic Panel, MPPT, LabVIEW, Arduino, P&O, Incremental Conductance.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente contínua

CI – Circuito Integrado

DC – Direct Current – corrente contínua

LIFA – Labview Interface for Arduino

MPPT – Maximum Power Point Tracking – Rastreador de ponto de máxima potência

PWM – Pulse Width Modulation – Modulação por largura de pulso

P&O – Perturbar e Observar

Vca – Tensão em corrente alternada

Vcc – Tensão em corrente contínua

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Índice de radiação solar no Brasil.....	12
Figura 2.2 - Funcionamento célula fotovoltaica.....	13
Figura 2.3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.....	15
Figura 2.4 - Painel fotovoltaico utilizado no trabalho	17
Figura 2.5 - Circuito utilizado para aquisição das curvas características do painel	18
Figura 2.6 - Curvas características do painel fotovoltaico (a) P x V e (b) I x V	18
Figura 2.7 - Curva característica de um PV destacando seu MPP	19
Figura 3.1 - Motor CC e suas partes	22
Figura 3.2 - A corrente, força e campo magnético em um motor CC	22
Figura 4.1 - Foto de um Arduino UNO	23
Figura 4.2 - Exemplo de um VI no software NI Labview	24
Figura 5.1 - Método P&O.....	26
Figura 5.2 - Valor das derivadas na curva Potência x Tensão.....	27
Figura 5.3 - Algoritmo MPPT condutância incremental	28
Figura 5.4 - Circuito eletrônico utilizado no projeto	29
Figura 5.5 - Circuito físico utilizado no projeto	30
Figura 5.6 – Método Condutância Incremental implementado no Labview NI.....	31
Figura 5.7 - Método Perturbar e Observar implementado no Labview NI.....	32
Figura 5.8 - Aquisição de corrente e tensão do sistema proposto	32

Figura 5.9 - Algoritmo MPPT Perturbar e Observar	33
Figura 5.10 - Algoritmo MPPT Condutância Incremental	34
Figura 5.11 - Geração de sinal PWM	35
Figura 5.12 - Tela do supervisor criada no Labview NI.....	35
Figura 6.1 - Teste com algoritmo Perturbar e Observar	36
Figura 6.2 - Teste com o algoritmo Condutância Incremental	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros experimentais avaliados para o PV utilizado no projeto 18

LISTA DE SÍMBOLOS

I_R = corrente reversa do diodo.

I_D = corrente produzida pela célula fotovoltaica.

I_L = corrente diretamente proporcional à radiação λ incidente na placa

R_{SH} = imperfeições das células.

R_S = perdas por dissipação de calor.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivo geral	11
1.2	Objetivo específico	11
1.3	Justificativa.....	11
1.4	Metodologia proposta	11
2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	12
2.1	Definição	12
2.2	Painel solar fotovoltaico	13
2.2.1	Características Elétricas dos Painéis Solares	14
2.2.2	Modelo matemático de um painel solar	14
2.2.3	Curvas características I x V e P x V	17
2.3	Algoritmos de rastreamento da máxima potência (MPPT)	19
2.3.1	Técnicas de MPPT	19
3	MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA.....	21
3.1	Constituição	21
3.2	Princípios de funcionamento	22
4	ARDUINO E NI LABVIEW.....	23
4.1	Arduino.....	23
4.2	NI Labview	24

5	MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS	26
5.1	Estratégias de controle	26
5.1.1	Pertube&Observe	26
5.1.2	Condutância incremental	27
5.2	Módulo implementado.....	29
5.3	Software NI Labview.....	31
6	RESULTADOS	36
7	CONCLUSÃO.....	38

1 INTRODUÇÃO

Energia é a capacidade que um determinado sistema tem em realizar trabalho. Ela pode ser mecânica, química, eletromagnética, elétrica, etc. A energia elétrica, uma das mais utilizadas no dia a dia da humanidade, pode ser gerada por meio de fontes renováveis de energia (movimento das águas, força dos ventos, radiação solar, etc.) ou fontes não-renováveis (combustíveis fósseis e nucleares).

A energia gerada através da radiação solar além de ser uma energia totalmente limpa, tem um grande potencial na conversão para energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos, isso porque todo ano a energia incidente na atmosfera do planeta terra é de $1,5 \times 10^8 kWh$ o que corresponde à dez mil vezes a energia consumida no planeta durante o mesmo período de tempo. Ou seja, aproveitar essa energia que é irradiada todos os dias na terra pode ser a solução de grandes problemas no planeta (KREZNINGER, 2010).

Hoje o uso da energia solar para aquecer água nas casas vem crescendo devido a redução do investimento inicial de todo o projeto. Apesar disso a geração de energia elétrica através da irradiação solar ainda é algo que vem caminhando com pequenos passos, principalmente no Brasil.

O que dificulta a conversão desta energia é a baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos e também porque a tensão e corrente geradas por eles além de não serem lineares, variam de acordo com a posição e incidência do sol nos mesmos. Desta forma para alavancar a eficiência do sistema, diversos recursos são necessários para que o mesmo se torne válido e eficiente. Um dos recursos que é muito utilizado nesse caso é a busca pelo ponto da máxima potência fornecida pelo painel fotovoltaico (B & PRADHAN, 2003).

Um rastreador pelo ponto de máxima potência é uma técnica que tem como função encontrar automaticamente o ponto de operação onde ocorre a máxima produção de potência de saída P_{MPPT} (ROCHA, 2016).

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de controle para um motor de corrente contínua utilizando técnicas de MPPT.

1.2 Objetivo específico

O objetivo deste trabalho foi implementar dois programas onde o ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico é encontrado utilizando um microcontrolador Arduino UNO com o algoritmo P&O e Condutância Incremental. O Arduino UNO é responsável por aquisição de dados dos sensores de corrente e tensão dos painéis fotovoltaicos e pela saída de um sinal PWM, que ditará o valor do ciclo de trabalho entregue ao circuito, onde o painel alimenta a carga de modo a atingir o MPP.

1.3 Justificativa

Este trabalho tem como justificativa aumentar a eficiência de painéis fotovoltaicos, tornando assim viável a conversão de energia solar em elétrica. Diversos trabalhos como esse já foram implementados e foi notado um aumento de mais de 30% da eficiência dos mesmos.

1.4 Metodologia proposta

Estudo, simulação, desenvolvimento, implementação de um circuito capaz de acionar um motor CC, fazer com que o mesmo opere no ponto de máxima potência do painel fotovoltaico, e realização de uma análise comparativa dos resultados obtidos.

2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Neste capítulo será discutido conceitos sobre energia solar e componentes que são utilizados em um sistema fotovoltaico.

2.1 Definição

Sistemas fotovoltaicos tratam-se de módulos de células fotovoltaicas que são capazes de converter a irradiação solar em corrente elétrica. Essa corrente elétrica para ser utilizada deve ser coletada e tratada por componentes eletrônicos, tornando-se útil para reduzir a conta de energia do consumidor ou até mesmo torna-lo totalmente independente de empresas de distribuição energética (GAZOLI & VILLALVA, 2012). No Brasil o potencial de exploração de energia solar é enorme, devido à grande incidência de radiação solar por todo território nacional, com médias anuais de 4500 a 6000 Wh/m^2 , como é possível verificar na figura 2.1.

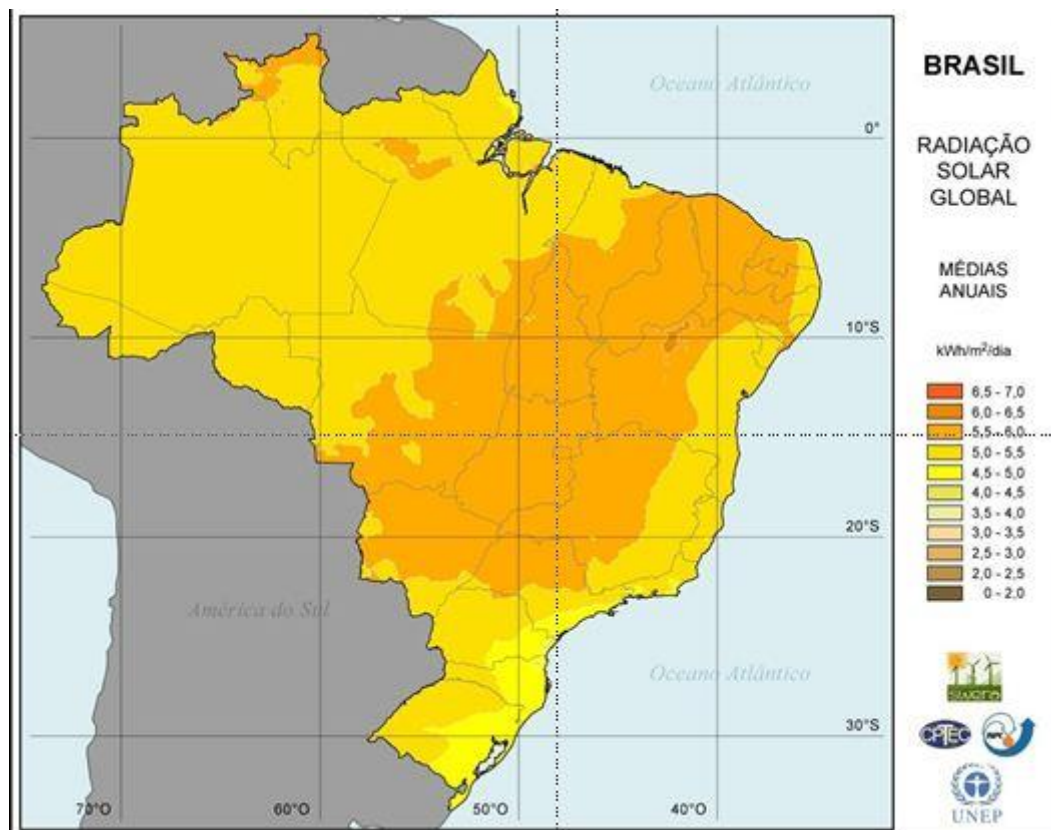


Figura 2.1 - Índice de radiação solar no Brasil

FONTE: SolarGIS, 2013.

2.2 Painel solar fotovoltaico

Também conhecidos como módulos fotovoltaicos, os painéis solares são os componentes mais importantes para a geração de energia solar. A sua construção é feita pela junção de várias células fotovoltaicas que sozinhas produzem pouca eletricidade, mas quando ligada em um esquema serie e/ou paralelo formam os módulos que normalmente atingem potências de 50 a 100 W (CASTRO, 2002).

Segundo Villalva e Gazoli (2012), uma célula fotovoltaica é composta pela junção de duas camadas de materiais semicondutores (materiais que não podem ser classificados como condutores ou isolantes) dos tipos P e N. Quando o sol irradia na região do tipo N e há um circuito fechado, os elétrons passam para a camada P, gerando assim um campo elétrico e consequentemente uma corrente elétrica. A figura 2.2 ilustra melhor esse processo (GAZOLI & VILLALVA, 2012).

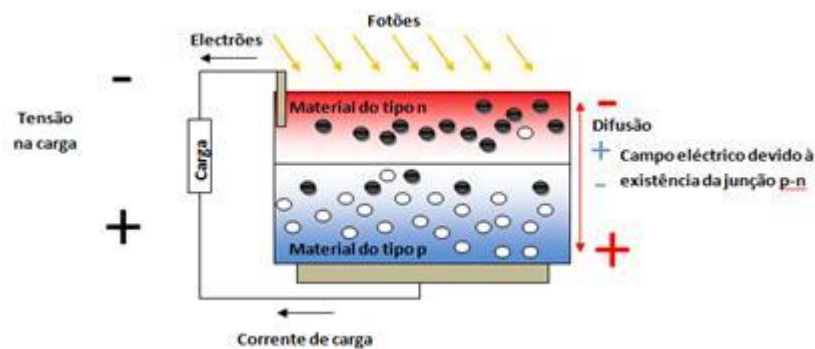


Figura 2.2 - Funcionamento célula fotovoltaica

FONTE: NASCIMENTO, 2004.

Hoje o material mais utilizado para fabricar painéis fotovoltaicos é o Silício (Si), sendo que eles podem ser constituídos de silício monocristalino, silício policristalino e também de filmes finos (ALMEIDA, et al., 2012).

As células de silício monocristalino tem um rendimento energético alto, cerca de 16% para fins comerciais, porém, sua produção requer um uso de técnicas complexas e relativamente caras. Em compensação, as policristalinas tem um custo de produção um pouco abaixo mas

deixa a desejar em relação a sua eficiência, algo em torno de 12% para fins comerciais. Já as células de filmes finos são as que requerem menor investimento e gasto energético para sua produção, mas tem também o menor rendimento energético, cerca de 9%. A grande vantagem das células de filme finos é que como já diz o nome elas são películas muito finas, podendo ser utilizadas em locais como, janelas ou portas de vidros podendo-se assim obter um enorme proveito energético (PORTAL ENERGIA, 2011).

2.2.1 Características Elétricas dos Painéis Solares

Normalmente um painel para uso comercial é caracterizado pela sua potência máxima, porem existem outras características que também são importantes quando se trata do seu uso em laboratórios.

- Tensão de circuito aberto (V_{OC}): Máximo valor de tensão entregue pelo circuito. Para encontrar esse valor o restante do circuito deve estar aberto de forma que a corrente de circulação e, conseqüentemente, sua potência sejam nulas.
- Corrente de curto-circuito (I_{SC}): Máximo valor de corrente entregue pelo circuito. Esse valor é encontrado curto-circuitando a célula, fazendo com que o valor de tensão seja nulo, assim como da potência.
- Máxima potência de saída (P_{MPP}): Máximo valor de potência que pode ser entregue pela célula. É o valor onde $V \times I$ é máximo.
- Tensão de máxima potência (V_{MPP}): É o valor de tensão onde a máxima potência da célula será encontrada.
- Corrente de máxima potência (I_{MPP}): É o valor de corrente onde a máxima potência da célula será extraída.

2.2.2 Modelo matemático de um painel solar

O modelo matemático simplificado de um painel fotovoltaico pode ser representado pela figura 2.3.

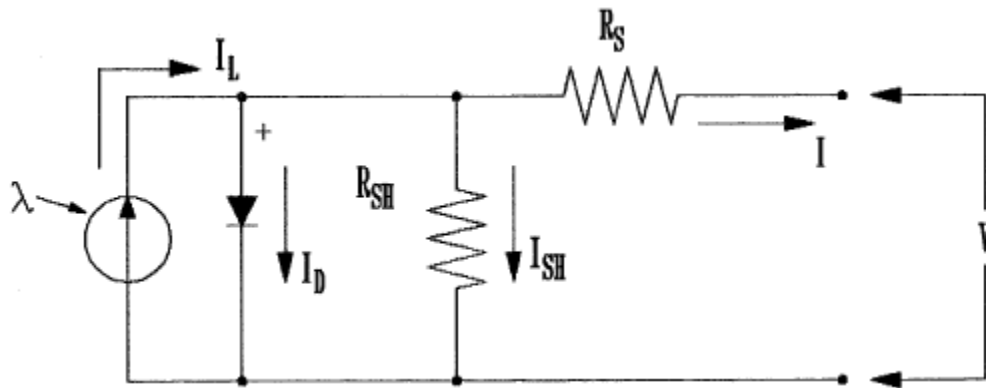


Figura 2.3 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica

FONTE: ROCHA, 2016.

A célula fotovoltaica quando conectada a um circuito elétrico externo se comporta como uma fonte de corrente contínua produzindo uma corrente I_L diretamente proporcional à radiação λ incidente na placa. I_D é a parcela da corrente gerada que é perdida devido a recombinação de portadores de carga. Outras perdas também existentes no circuito são relacionadas a correntes parasitas, imperfeições das células dentre outras que são representadas pela resistência R_{SH} . Já a resistência R_S representa as perdas por dissipação de calor devido aos elementos resistivos da placa. (ROCHA, 2016)

A corrente produzida pela célula é dada então por:

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (2.1)$$

I_D pode ser calculada por:

$$I_D = I_R \left(e^{\frac{V+IR_S}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Sendo que

I_R = corrente reversa do diodo;

V = tensão no circuito;

V_T = tensão térmica dada por:

$$V_T = \frac{AKT}{Q}$$

Onde:

Q = carga do elétron;

A = constante de ajuste da curva;

K = constante de Boltzmann

T = Temperatura absoluta em Kelvin.

Como normalmente a corrente I_{SH} e a queda de tensão na resistência R_S são muito pequenas e podem ser desprezadas, a corrente I pode ser calculada por:

$$I = I_L - I_R \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Vamos levar em consideração dois pontos em particular de operação da célula.

Curto-circuito:

$$V = 0;$$

$$I_D = 0;$$

$$I = I_L = I_{CC};$$

I_{CC} (corrente de curto-circuito) é a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico. Esse valor é característico de cada célula e é diretamente proporcional à iluminação na placa. (CASTRO, 2002)

Circuito-aberto:

$$I = 0;$$

$$V = V_T \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_R} \right)$$

V (tensão de circuito-aberto) é o valor máximo de tensão quando o circuito está em vazio. É também um valor característico da célula. (CASTRO, 2002)

2.2.3 Curvas características I x V e P x V

Neste trabalho, foi utilizado um painel fotovoltaico de silício monocristalino de 17,8cm x 11,4cm como o da foto 2.4. Segundo o *datasheet* do fabricante, sob condições ideais de iluminação, a tensão de circuito-aberto $V_{oc} = 8V$ e a corrente de curto-circuito é $I_{sc} = 0,31A$.



Figura 2.4 - Painel fotovoltaico utilizado no trabalho

Como diversos fatores podem influenciar nos valores de V_{oc} e I_{sc} o circuito descrito na figura 2.5 foi montado para determinar as curvas características do painel I x V e P x V, e consequentemente os valores característicos do painel. No circuito o transistor NPN TIP122 é utilizado como um resistor linear variável, onde a carga elétrica vista pelo painel varia de acordo com a corrente aplicada na base no transistor, controlada pela saída do 3 do Arduino UNO. A tensão do painel é medida diretamente, entrada A0, e a sua corrente através do resistor de 1Ω , pela entrada A1 do Arduino. As curvas I x V e P x V para dois níveis de iluminação são apresentadas na figura 2.6. E os valores característico do painel é apresentado na tabela 2.1. (ROCHA, 2016)

Tabela 2.1 - Parâmetros experimentais avaliados para o PV utilizado no projeto

	PV
V_{OS}	9,1021 V
I_{SC}	0,2203 A
V_{MPPT}	7,9942 V
I_{MPPT}	0,2010 A

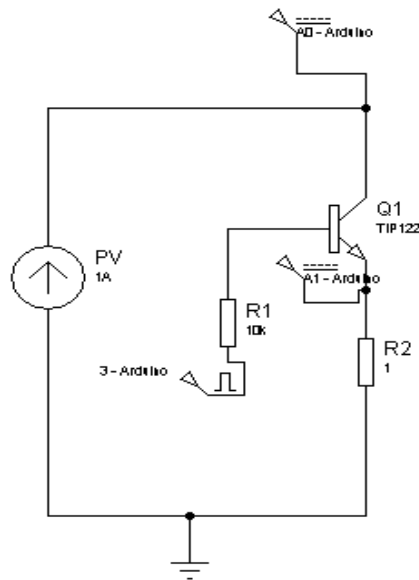
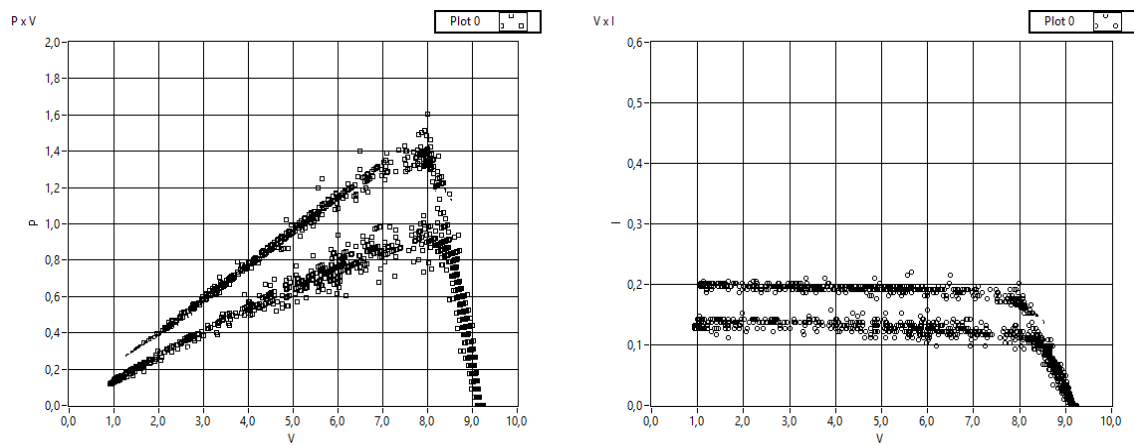


Figura 2.5 - Circuito utilizado para aquisição das curvas características do painel

Figura 2.6 - Curvas características do painel fotovoltaico (a) $P \times V$ e (b) $I \times V$

2.3 Algoritmos de rastreamento da máxima potência (MPPT)

Existem algumas técnicas para aumentar o rendimento energético das placas fotovoltaicas, e uma delas é utilizar algoritmos que encontram automaticamente o ponto de operação onde ocorre a máxima produção de energia de saída P_{MPP} (ROCHA, 2016).

A figura 2.7 mostra as curvas características (I x V e P x V) de um determinado painel solar, nela também é ilustrado os determinados valores de I e V para que a potência máxima de saída seja entregue a carga. O trabalho do algoritmo implementado é fazer com que o painel enxergue somente o valor de uma carga que extraia a máxima potência do mesmo. (ROCHA, 2016)

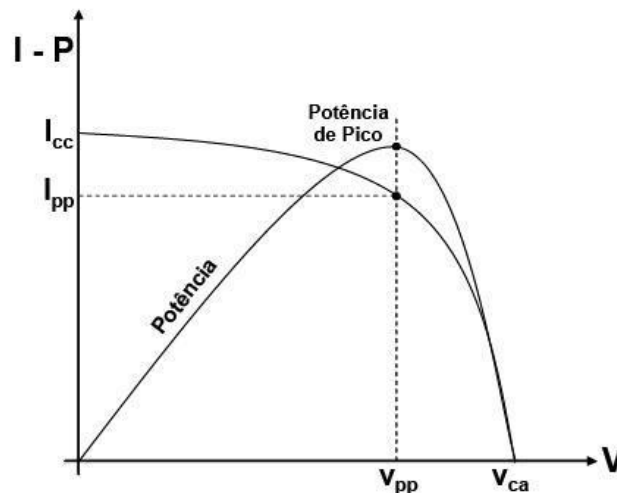


Figura 2.7 - Curva característica de um PV destacando seu MPP

2.3.1 Técnicas de MPPT

- Perturbar e Observar: O método P&O é o mais utilizado até hoje devida a sua fácil implementação. Este método é baseado na perturbação da voltagem de operação. Embora seja o mais utilizado atualmente, este algoritmo tem como ponto negativo a oscilação existente em torno do MPP e a quantidade de potência perdida neste ponto.
- Métodos de inteligência artificial: Os métodos que utilizam inteligência artificial como lógica *fuzzy* ou rede neural providenciam uma solução mais rápida e precisa para o problema de encontrar o ponto de máxima potência, mas normalmente são mais complicados para implementar, dificultando o seu uso em certas aplicações.

- Voltagem constante: O método da voltagem constante é baseado na relação entre V_{MPP} e a tensão de circuito aberto. Apesar de ser um método relativamente simples, encontrar o valor ideal da constante de proporcionalidade entre V_{MPP} e V_{oc} pode não ser uma tarefa fácil. E, ainda mais importante, existe a exigência de uma interrupção repentina da energia da placa fotovoltaica para medir a tensão de circuito aberto.
- Corrente de curto-circuito: O método da corrente de curto-circuito se baseia no fato que a corrente no ponto de máxima potência I_{MPP} é praticamente linear a corrente de curto-circuito I_{sc} , onde existe uma constante de proporcionalidade que deve ser calculada para cada painel fotovoltaico em específico. Para medir I_{sc} uma chave é adicionada ao conversor de potência para curto-circuitar o painel com uma determinada frequência (ROCHA, 2016).
- Condutância incremental: O método de condutância incremental é baseado no fato de que a curva entre potência e tensão do gerador PV, com irradiação solar e níveis de temperatura constantes, normalmente possui apenas um MPP. O ponto de potência máxima pode ser encontrado comparando a condutância instantânea (I/V) com a condutância incremental ($\Delta I/\Delta V$) (DASH, 2014).

3 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Um motor elétrico é uma máquina capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica, sendo que essa máquina pode ser acionada utilizando CC ou CA. Basicamente o motor é ligado a uma fonte de eletricidade, absorve essa energia e a transforma em torque para acionar uma carga mecânica (HECKLER, 2012)

Nos dias de hoje, fatores como o desenvolvimento de técnicas de acionamento de CA e economia em custos, tem feito com que haja grande substituição de máquina CC por máquinas de indução acionados via inversores de frequência. Mesmo assim, os motores CC são considerados para muitas aplicações insubstituíveis devido à algumas de suas características e vantagens. (LOUREIRO, 2006)

3.1 Constituição

Basicamente um motor CC é constituído de duas estruturas magnéticas sendo que uma é a parte fixa (enrolamento de campo ou ímã permanente), e a outra é a parte móvel (enrolamento de armadura). Também está presente nas máquinas CC duas estruturas necessárias para fazer a inversão dos sentidos da corrente e para conduzir a energia para o rotor. A figura 3.1 mostra a estrutura típica de um motor CC e suas principais partes (SILVEIRA, s.d.). Todas as partes serão melhores explicadas abaixo.

- Estator: Parte fixa da máquina, o estator é montado em volta do rotor, de modo a permitir que o mesmo gire internamente. Ele é composto de uma estrutura ferromagnética envolto com um enrolamento chamado de enrolamento de campo ou por um ímã permanente, ambos têm a função de produzir um campo magnético fixo para interagir com o campo da armadura.
- Anel comutador: Montado junto o eixo da máquina o comutador gira junto com o mesmo para produzir a troca entre os circuitos do enrolamento. Ele é formado por um material condutor separado por matérias isolantes para fechar os circuitos entre as bobinas, o enrolamento de armadura e as escovas, no momento adequado.
- Rotor: Parte móvel da máquina, o Rotor também é construído por um material ferromagnético envolto com enrolamentos em sua superfície que são alimentados pelo anel comutador.

- Escovas: Peças de grafite que são responsáveis por conduzir energia ao rotor.

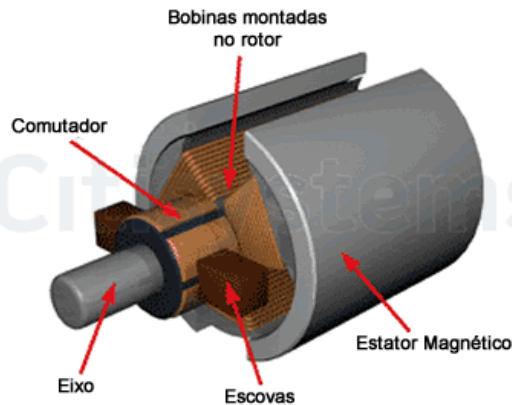


Figura 3.1 - Motor CC e suas partes

FONTE: Citisystems,2012

3.2 Princípios de funcionamento

Na figura 3.2, o estator, como definido acima, é constituído por um material eletromagnético, desta forma, ao aplicar uma tensão aos terminais do seu enrolamento acontecerá uma intensificação no seu campo magnético, acontecendo assim a produção de polos magnéticos indicados pelas setas azuis. Quando o rotor (representado por uma bobina que é alimentada pelo comutador) em que circula uma corrente (indicada pelas setas vermelhas) é introduzido dentre desse campo magnético, ele experimenta uma força mecânica (indicada pelas setas verdes) promovendo assim um torque e o giro do motor.

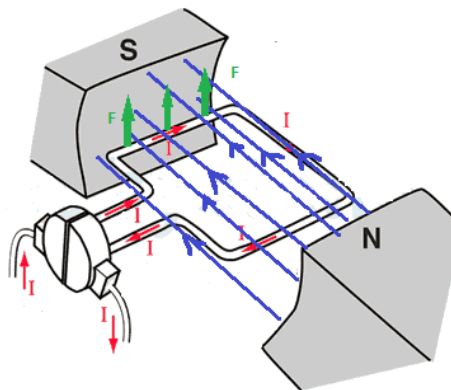


Figura 3.2 - A corrente, força e campo magnético em um motor CC

FONTE: Citisystems,2012

4 ARDUINO E NI LABVIEW

Um microcontrolador nada mais é que um CI programável, que executa, com um determinado ciclo de tempo, um código que é gravado em sua memória. Todo microcontrolador conta com um processador, uma memória de leitura e escrita para armazenar dados, memória somente leitura para armazenar o programa a ser executado, EEPROM para armazenamento permanente de dados, dispositivos como conversores de analógicos/digitais (ADC) e digitais/analógicos (DAC) e em alguns casos interface de entrada e saídas de dados. (ROCHA, 2016)

4.1 Arduino

Segundo o site do produto, Arduino é uma plataforma de código aberto o qual utiliza um microcontrolador *Atmel AVR* que é capaz de ler entradas como luzes de um sensor, detectar mudança de estado por exemplo de um botão ou até mesmo uma mensagem do *Twitter*, e converter isso em saídas como acionamento de um motor, ligar e desligar um LED e outras infinitas ações (Arduino, 2017). A figura 4.1 mostra um Arduino UNO.

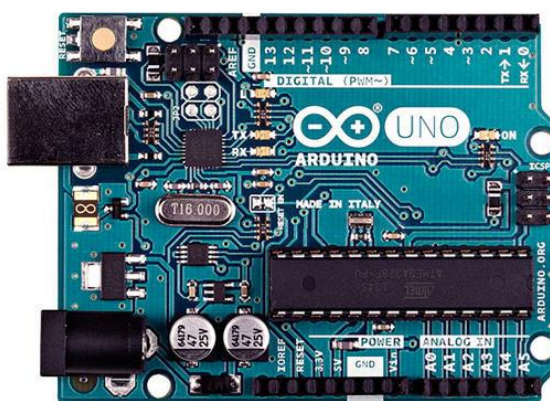


Figura 4.1 - Foto de um Arduino UNO

FONTE: Arduino,2017

Toda sua programação é feita baseada em C/C++ e modelada a partir de linguagem *Wiring* através de uma plataforma que é disponibilizada gratuitamente em seu site oficial. Essa

plataforma é responsável por compilar o programa escrito pelo usuário e com a placa do Arduino conectada ao computador através de uma porta USB, fazer o download do programa para a placa. Após o download concluído o Arduino só precisa de uma alimentação de 5v para funcionar, mas se conectado ao computador pode trocar informações que podem ser manipuladas ou então servir apenas para análise de dados do usuário.

4.2 NI Labview

Labview é uma plataforma de desenvolvimento e programação destinada a engenheiros e cientistas. Sua linguagem de programação é baseada em uma linguagem gráfica que utiliza fluxo de dados que permite a aquisição de dados, instrumentação, controle e automação de sistemas domésticos a industriais. Os programas do Labview são chamados de Instrumentos Virtuais (VI), esse nome é devido aos seus instrumentos realmente parecerem com instrumentos físicos, como osciloscópios e multímetros (National Instruments, s.d.).

Ao criar um VI duas janelas são abertas, como mostra a figura 4.2, e todo componente adicionado ao programa é adicionado as duas telas. De uma forma geral podemos dizer que o Painel Frontal seria a uma tela de supervisorio, onde o usuário é capaz de visualizar o processo através de gráficos e também atuar no processo utilizando potenciômetros por exemplo. A outra tela, chamada de Diagrama de Blocos, é onde toda programação é feita. Nele se encontram subVIs, funções, estruturas e fios que transferem dados entre objetos.

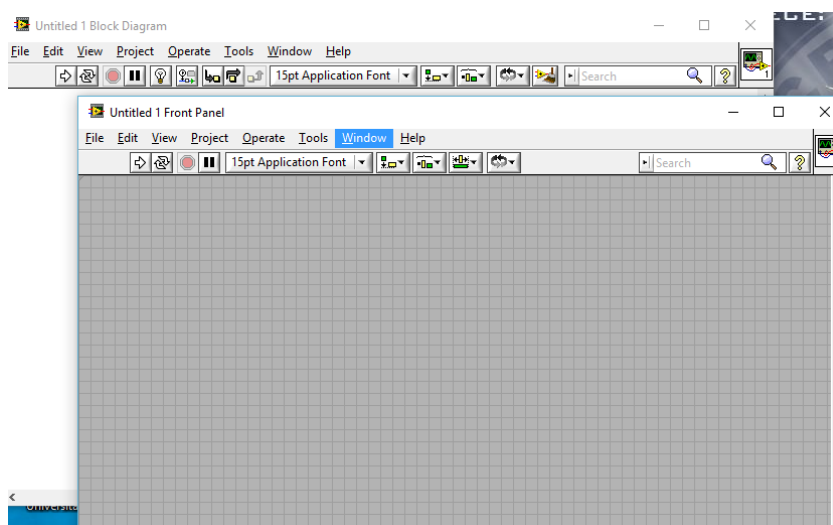


Figura 4.2 - Exemplo de um VI no software NI Labview

O *Labview Interface for Arduino* (LIFA) é um *toolkit* grátis que permite fazer a aquisição de dados pelo Arduino e trata-lo dentro do ambiente de programação do Labview. Essa técnica dá ao usuário a capacidade de utilizar todas as ferramentas disponíveis pelo *software* da *National Instruments* em conjunto com o microcontrolador Arduino, permitindo a aquisição, manipulação, análise, conectividade, exibição de dados em tempo real. (National Instruments, s.d.)

5 MÉTODOS E MATERIAIS UTILIZADOS

5.1 Estratégias de controle

Como foi discutido ao longo dos capítulos 1 e 2, a busca pelo ponto de máxima potência é muito interessante para diversas aplicações que utilizam painéis fotovoltaicos pois permitem que os mesmos operem nos seus pontos de máxima potência mesmo que ocorra alterações como incidência solar, mudança de carga ou variação de temperatura.

No capítulo 2 foi discriminado algumas das várias técnicas existentes para encontrar o MPPT. Neste capítulo iremos discutir melhor as duas técnicas que foram utilizadas no projeto além de explicar como foi feita toda a montagem do projeto.

5.1.1 Pertube&Observe

Este método, apresentado no fluxograma da figura 5.1, propõem uma solução para o problema da busca de máxima potência de uma forma simples e eficaz. Segundo Gazoli (2012), o método perturbar e observar é um método de baixa complexidade de implementação e com uma precisão média, sendo assim para determinadas aplicações podem ser mais que suficiente.

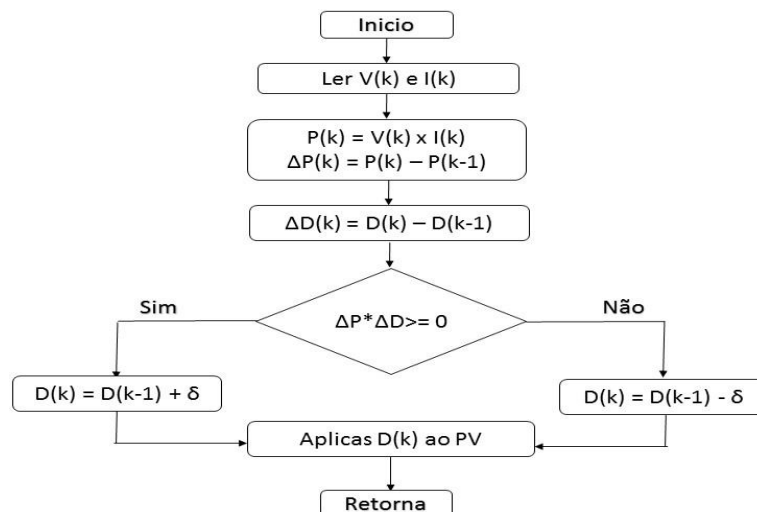


Figura 5.1 - Método P&O

A potência P gerada pelo painel, que é igual a potência entregue ao motor CC e pode ser calculada pelo produto entre a tensão no painel multiplicada pela corrente no motor. O ciclo de trabalho D é variado com a intenção de proporcionar perturbações no sistema e observar a mudança da potência gerada. Caso a derivada da potência em relação ao ciclo de trabalho for positiva é incrementado um valor ao ciclo de trabalho, sendo negativa o ciclo é decrementado. O sinal da derivada é obtido através da multiplicação da variação da potência pela variação do ciclo de trabalho, de forma a estar sempre buscando pelo momento em que essa multiplicação seja igual a zero, encontrando assim o MPPT.

5.1.2 Condutância incremental

Observando a figura 5.2 percebemos que a potência máxima será entregue a carga no momento em que temos um ponto de inflexão, ou seja, no momento em que a derivada da potência pela tensão seja igual a zero, equação 1. Desta forma os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência estão sempre em busca desse ponto.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (1)$$

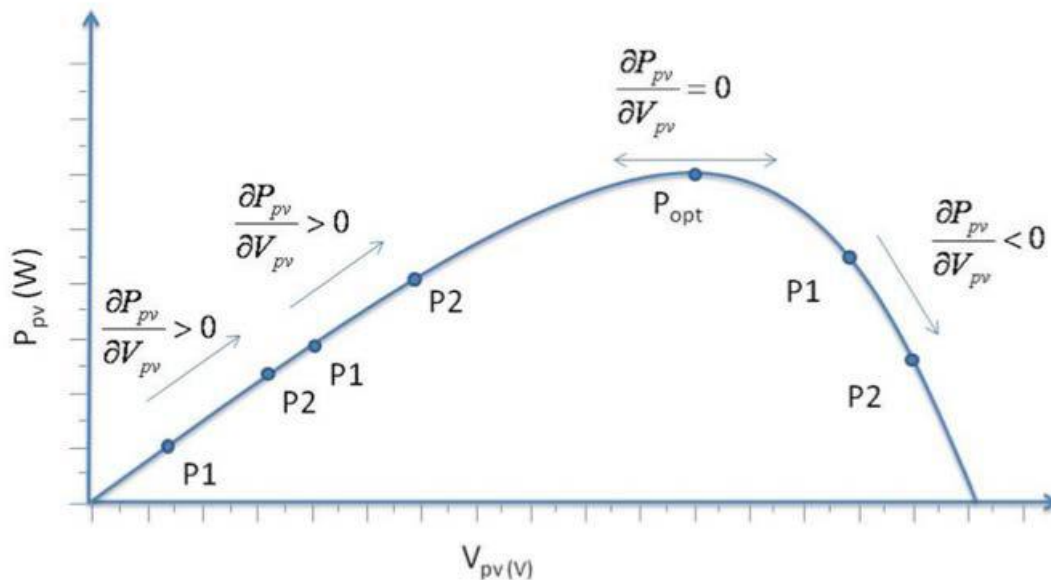


Figura 5.2 - Valor das derivadas na curva Potência x Tensão

FONTE: VILLALVA; GAZOLLI, 2012.

Reescrevendo a equação 1, temos que:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \cong I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (2)$$

Analisando ainda a figura 5.2 percebemos que quando a derivada é maior que zero, estamos à esquerda do MPP e quando a derivada é negativa estamos à direita do MPP, logo, utilizando a equação (2), obtemos a equação (3):

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \rightarrow \text{ponto de máxima potência} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \rightarrow \text{à esquerda do MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \rightarrow \text{à direita do MPP} \end{cases} \quad (3)$$

A partir da equação (3), é possível determinar o algoritmo através da aquisição da corrente e da tensão do painel em um instante e no instante menos um, e comparado com a relação entre corrente e tensão instantânea. Feito isso é possível determinar se a tensão do painel deve ser incrementada ou decrementada através da relação de trabalho do PWM.

Na figura 5.3 o algoritmo utilizado na condutância incremental é apresentado e é possível observar que tensão é incrementada ou decrementada de acordo com decisões tomadas durante o algoritmo.

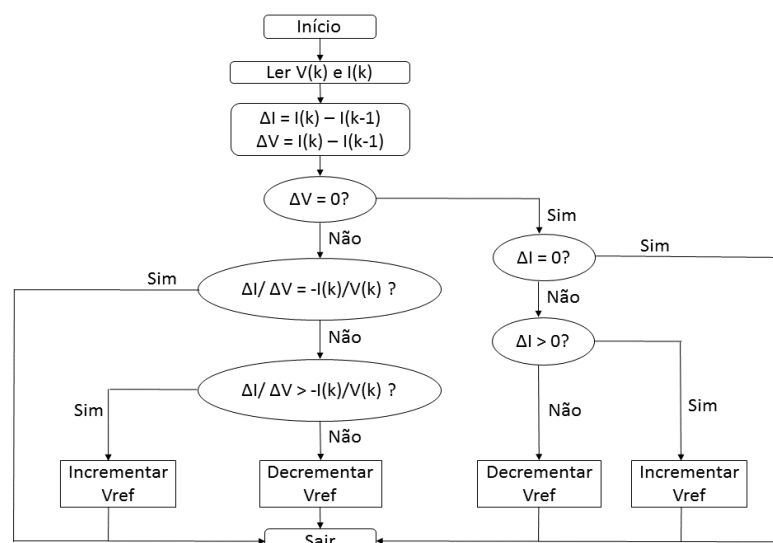


Figura 5.3 - Algoritmo MPPT condutância incremental

5.2 Módulo implementado

O módulo proposto por esse projeto, tem como objetivo fazer a aquisição da tensão e da corrente de um painel fotovoltaico (utilizando Arduino), tratar esses valores (utilizando a plataforma NI Labview) e de acordo com o método a ser utilizado (Perturbar e Observar ou Condutância Incremental) definir qual será o ciclo de trabalho da chave IRF740.

A figura 5.4 mostra o desenho esquemático do conversor de potência que foi utilizado no projeto e a figura 5.5 mostra esse circuito físico implementado. Neles estão presentes o painel fotovoltaico, o sensor de tensão, o sensor de corrente, a chave responsável por variar a tensão que é entregue a carga, o motor DC (representado a carga acionada pelo PV) e um diodo de roda-livre.

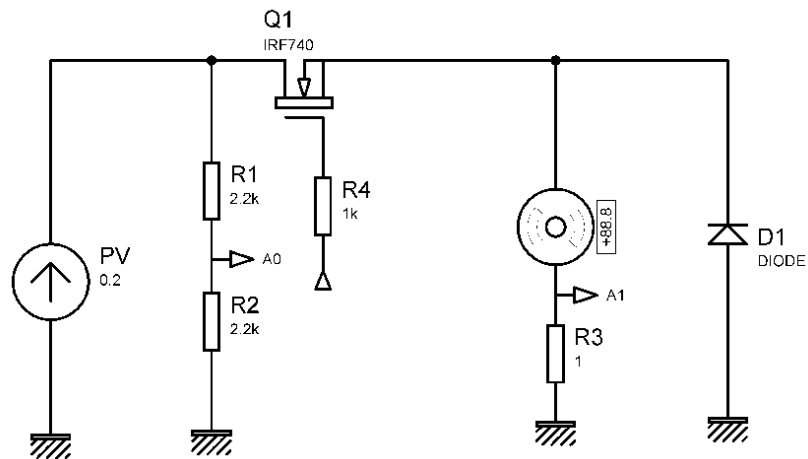


Figura 5.4 - Circuito eletrônico utilizado no projeto

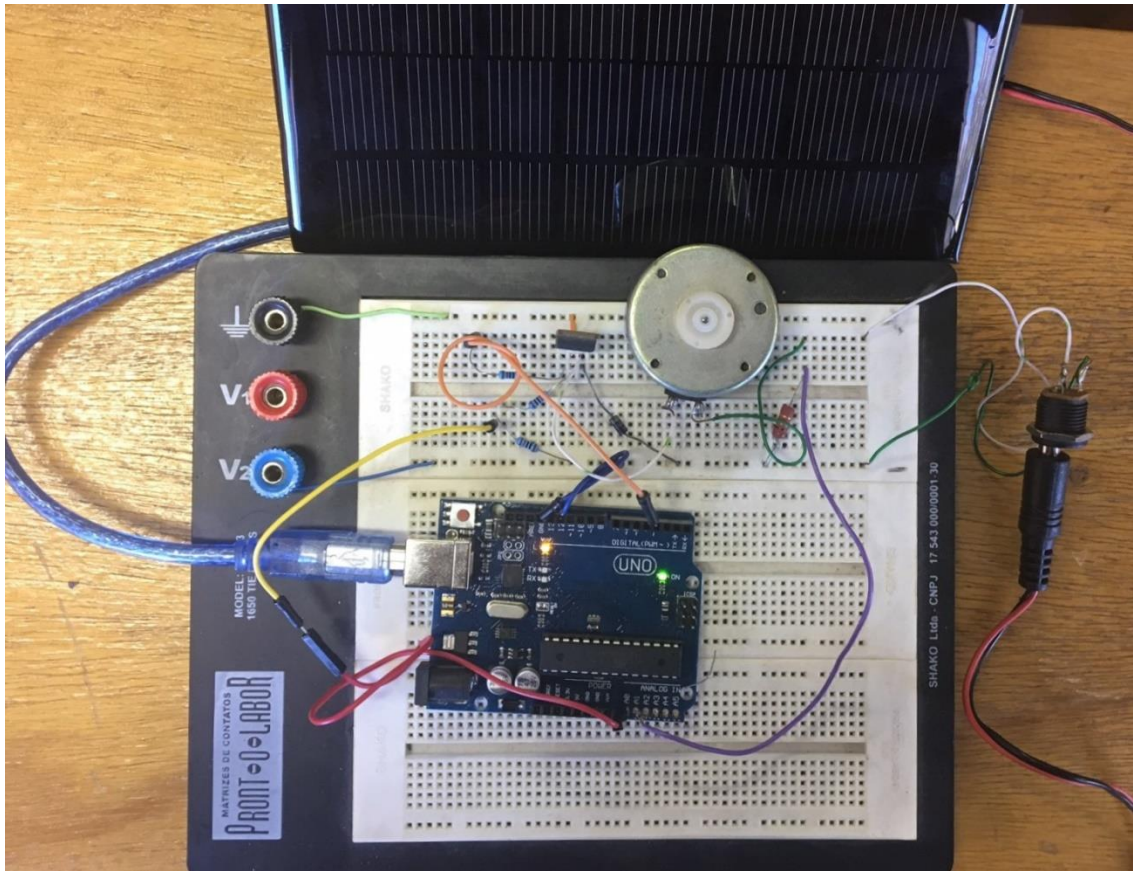


Figura 5.5 - Circuito físico utilizado no projeto

Para a aquisição da tensão do painel é utilizando um divisor de tensão formado por dois resistores de $R_1=2.2k\Omega$ e $R_2=2.2k\Omega$ e a sua aquisição é feita pelo canal A0 do Arduino UNO. Para o cálculo da corrente é inserido um resistor de 1Ω em serie ao motor CC e medido a queda de tensão sobre o mesmo, utilizando o canal A1 do Arduino UNO. Aplicando a lei de Ohm sobre esse valor, equação número 4, e então é encontrado o valor da corrente que passa pelo motor.

$$I = \frac{V}{R} \quad (4)$$

Em serie ao painel fotovoltaico existe um transistor MOSFET canal N tipo IRF740, que é acionado pela saída PWM 3 do Arduino UNO que determina o fluxo de potência do painel

para o motor. Um diodo é conectado em antiparalelo ao motor para funcionar como roda-livre.

5.3 Software NI Labview

Como já comentado, os dois softwares propostos (Perturbar e Observar e Condutância Incremental) foram implementados no NI Labview e como explicado no capítulo 4 o Labview conta com duas janelas diferente, uma onde se encontra o painel supervisorio e o diagrama de blocos de programação do software.

A programação feita no Labview NI é apresentada nas figuras 5.6 e 5.7 e para melhor entendimento vamos desmembrar a parte de programação em três partes: aquisição e tratamento de dados, lógica do algoritmo MPPT implementado e geração do sinal PWM do controlador.

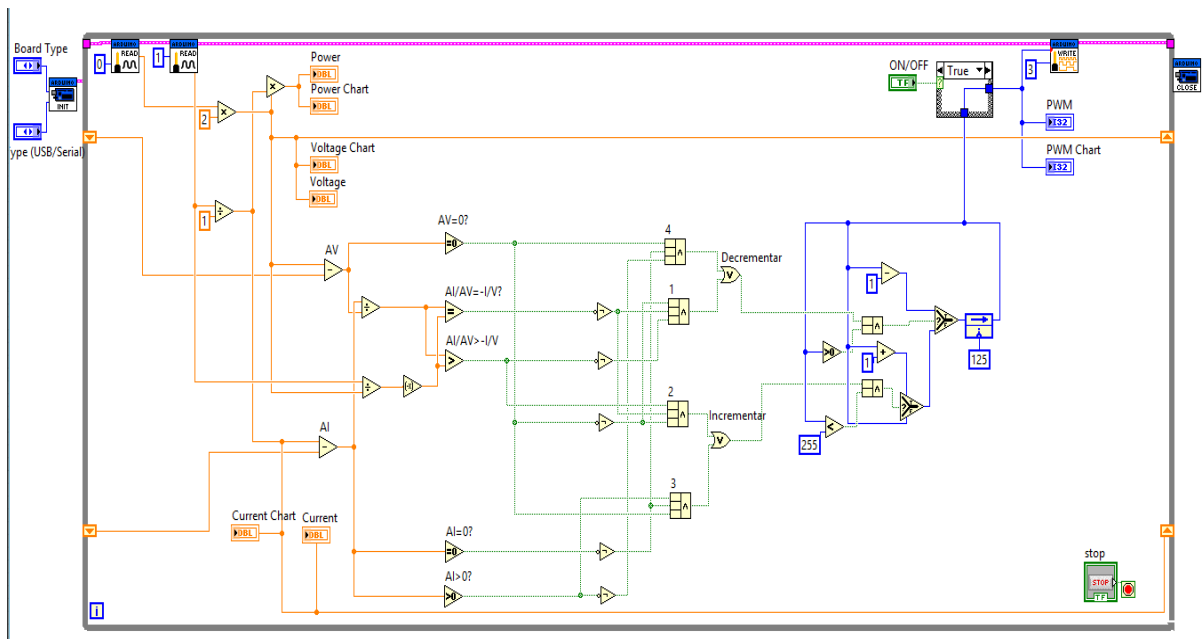


Figura 5.6 – Método Condutância Incremental implementado no Labview NI

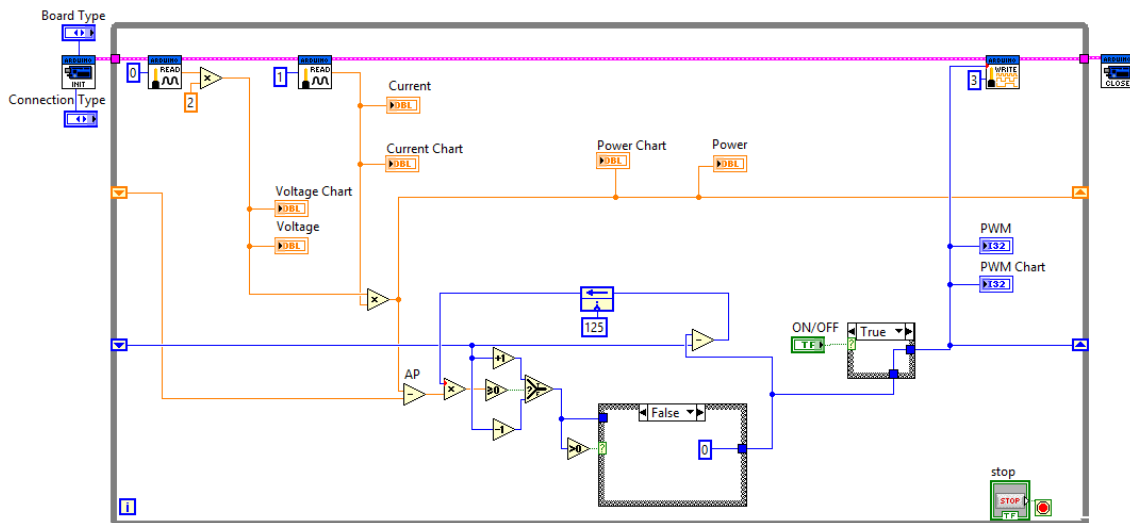


Figura 5.7 - Método Perturbar e Observar implementado no Labview NI

A figura 5.8 apresenta a aquisição e tratamento dos sensores de corrente e tensão do circuito.

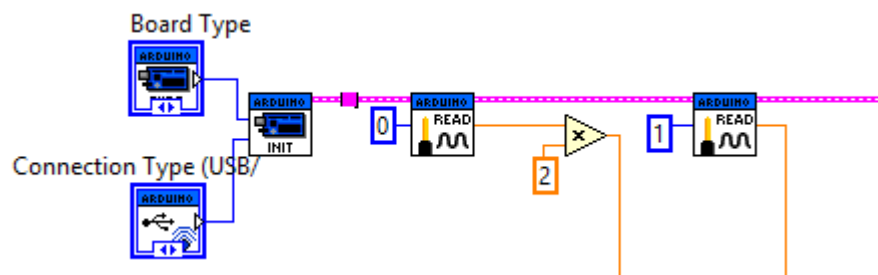


Figura 5.8 - Aquisição de corrente e tensão do sistema proposto

Para fazer a comunicação entre o Arduino UNO e o Labview NI, como explicado no capítulo anterior, é necessário fazer o download e instalar o pacote de ferramentas do Arduino disponível na plataforma do software. Feita a instalação da mesma já na janela de programação do Labview uma paleta do Arduino é adicionada e é possível adicionar diversos blocos para utilização na programação. A figura 5.8 mostra os blocos necessários para aquisição de dados, onde é selecionado qual o tipo de conexão é feito com a placa, no caso USB, o tipo da placa, no caso Arduino UNO e quais canais da placa serão utilizados para aquisição, no caso canal A0 e A1.

Como no divisor de tensão foi utilizado dois resistores de $2.2k\Omega$, o valor medido pelo Arduino é multiplicado por dois. Já na medição da corrente como foi utilizado um resistor de

1Ω pela equação 4 o valor medido pelo Arduino UNO é igual ao valor da corrente que passa pelo motor.

A primeira lógica do algoritmo MPPT implementada foi a Perturbar e Observar que é apresentada na figura 5.9 numerada de 1 a 6 com os principais pontos do algoritmo.

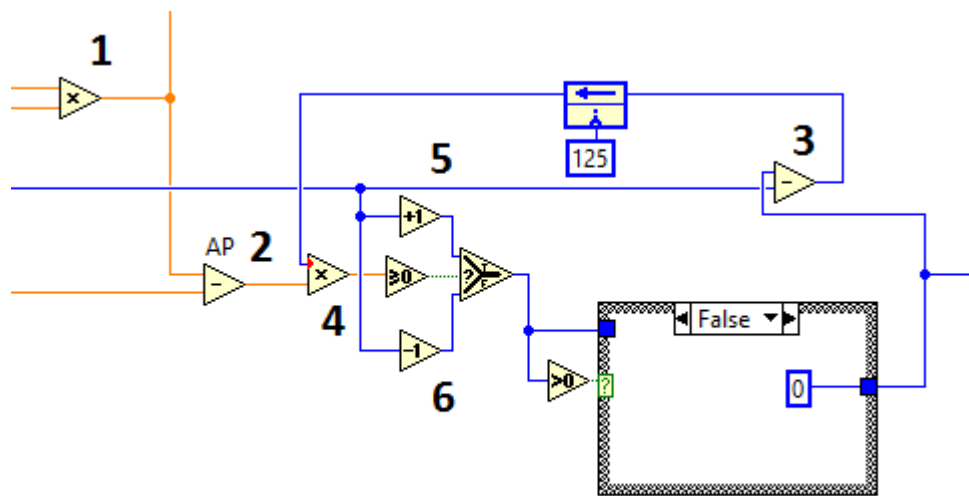


Figura 5.9 - Algoritmo MPPT Perturbar e Observar

- 1 – Determinação do valor da potência atual, multiplicando $I(k) \times V(k)$
- 2 – Determinação do valor da variação da potência, $P(k) - P(k - 1)$, do painel. Para isso foi utilizado o recurso *Shift Register* do Labview NI, para que o valor de um loop executado pudesse ser utilizado em um loop futuro.
- 3 – Determinação da variação do ciclo de trabalho, $D(k) - D(k - 1)$, do PWM. De forma análoga ao item 2, também foi utilizado o *Shift Register*.
- 4 – Determinação da multiplicação de $\Delta P \times \Delta D$.
- 5 – Resultado para incremento do ciclo de trabalho do PWM. Sempre que o resultado do item 4 for verdadeiro o PWM é incrementado.
- 6 – Resultado para decremento do ciclo de trabalho do PWM. Sempre que o resultado do item 4 for falso o PWM é decrementado.

A segunda lógica implementada foi o algoritmo MPPT Condutância Incremental apresentado na figura 5.10. A figura também é enumerada de 1 a 6, mostrando os principais pontos da lógica.

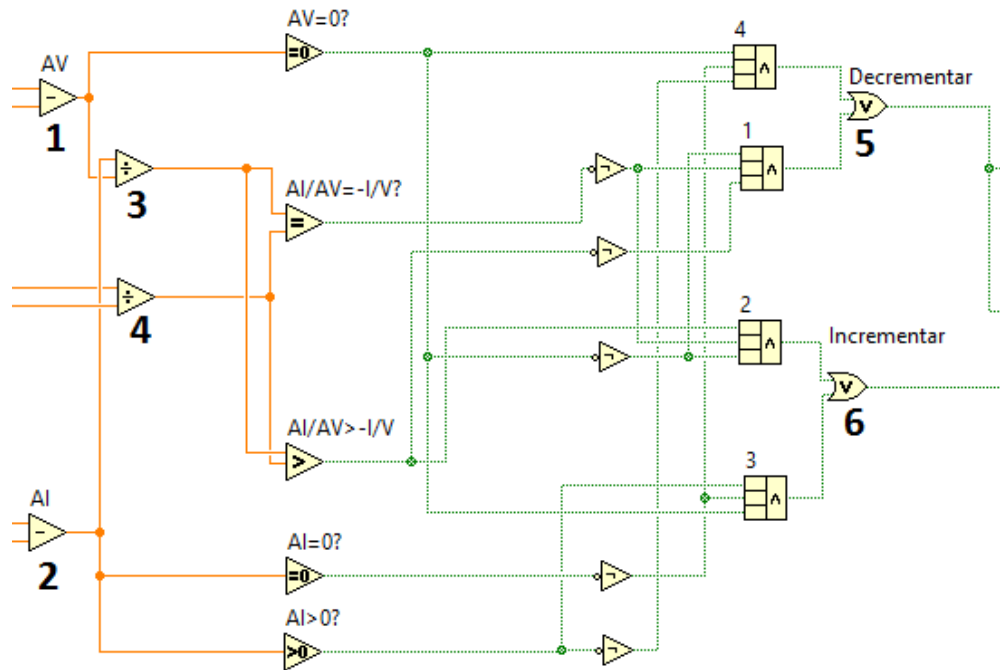


Figura 5.10 - Algoritmo MPPT Condutância Incremental

- 1 – Determinação do valor da variação da tensão, $V(k) - V(k - 1)$, do painel. Para isso foi utilizado o recurso Shift Register do Labview NI, para que o valor de um loop executado pudesse ser utilizado em um loop futuro.
- 2 – Determinação da variação do ciclo de corrente $I(k) - I(k - 1)$, do painel. De forma análoga ao item 2, também foi utilizado o Shift Register.
- 3 – Determinação da relação, $\Delta I / \Delta V$, utilizando bloco divisor.
- 4 – Determinação da relação, $-I/V$, também utilizando bloco divisor.
- 5 – Resultado da lógica de incremento. Esse resultado é encontrado de acordo com as comparações feitas no programa de acordo com a figura 5.3. Caso seja verdadeiro, o ciclo de trabalho do PWM é incrementado.

- 6 – Resultado da lógica de decremento. Assim como o item 5 esse resultado é encontrado de acordo com as comparações feitas no programa de acordo com a figura 5.9. Caso seja verdadeiro, o ciclo de trabalho do PWM é decrementado.

A figura 5.11 apresenta a parte de geração de sinal PWM de saída, que utiliza o bloco de escrita do LIFA escrevendo no pino 3 do Arduino UNO. O Labview NI gera um sinal que varia de 0 a 5 V e o envia para o pino 3 do Arduino UNO.

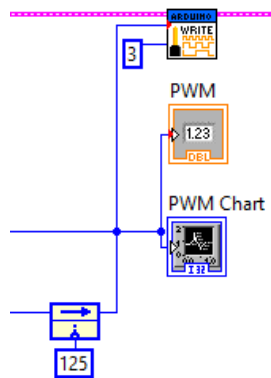


Figura 5.11 - Geração de sinal PWM

Na figura 5.12 é possível ver a tela do supervisor criada no Labview no momento em que foi feito um dos testes. Nela são mostrados 4 gráficos que mostram o valor da corrente, tensão e potência do painel e também o valor do ciclo que está sendo enviado ao PWM.

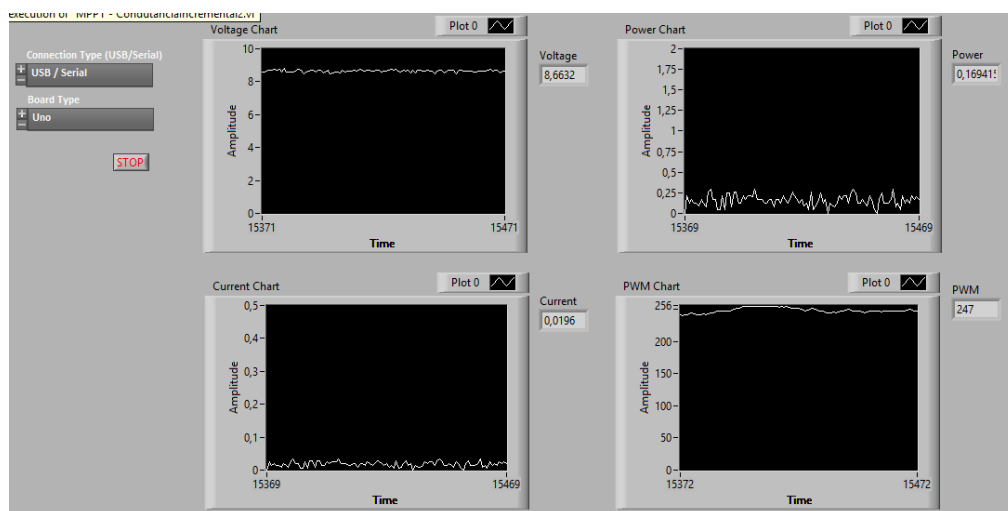


Figura 5.12 - Tela do supervisor criada no Labview NI

6 RESULTADOS

A figura 6.1 e 6.2 apresenta o resultado de um teste feito por volta das 15h com os dois algoritmos implementados no projeto. As figuras apresentam a evolução da tensão, corrente e potência aplicada ao motor e também apresentam como foi a variação do *DutyCycle* (representado pelo gráfico PWM) de cada algoritmo até que o Ponto de Máxima Potência fosse encontrado.

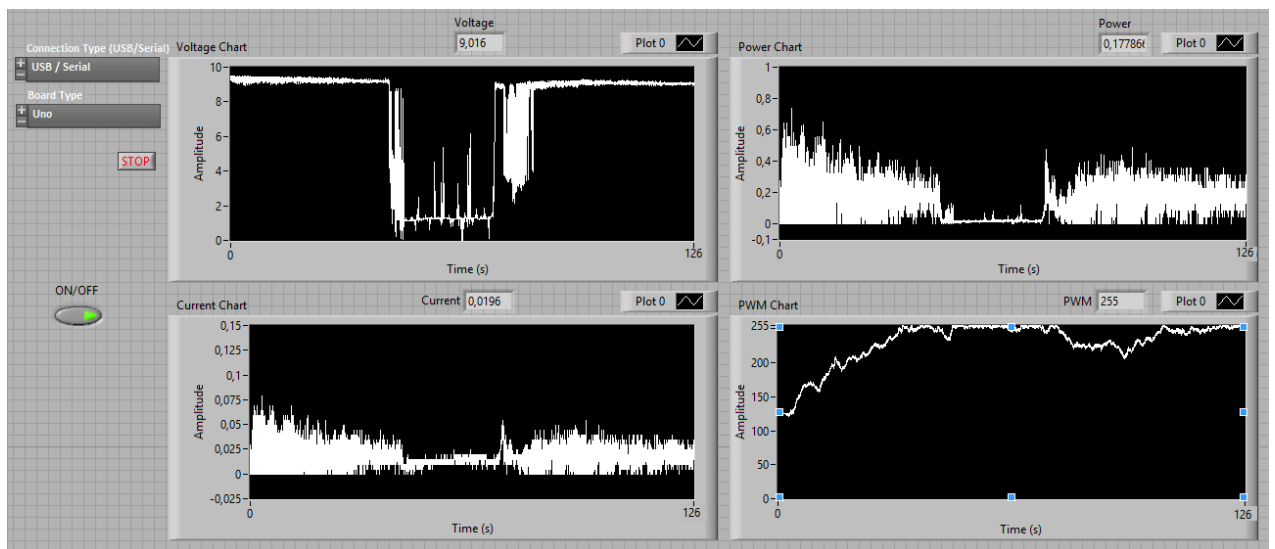


Figura 6.1 - Teste com algoritmo Perturbar e Observar

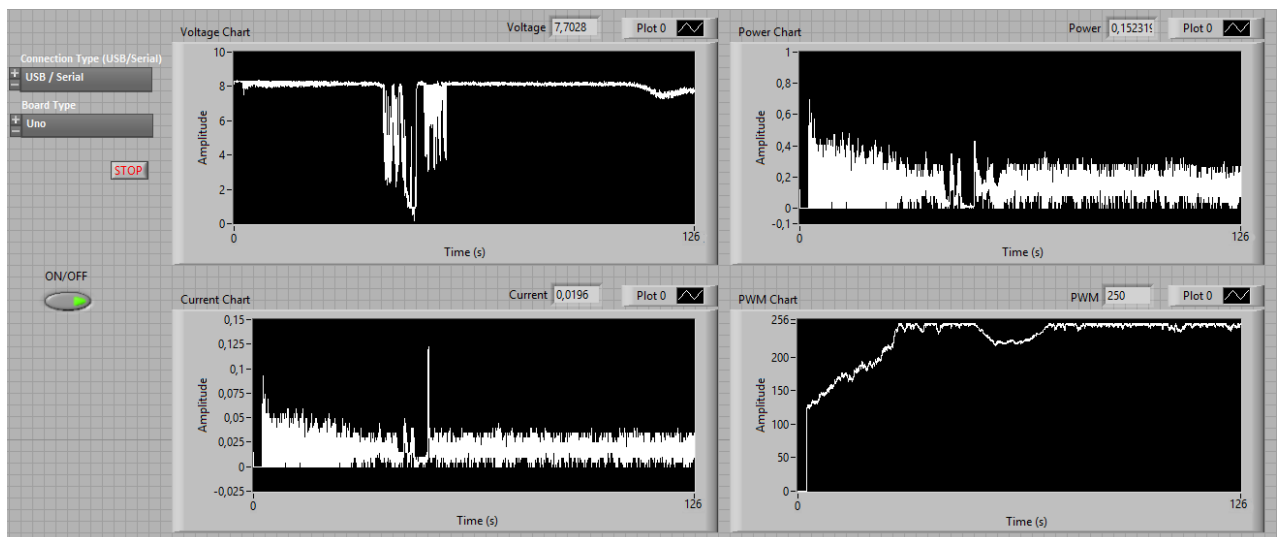


Figura 6.2 - Teste com o algoritmo Condutância Incremental

O ciclo de trabalho nos dois algoritmos varia até que o ponto de máxima potência é encontrado sendo que em ambos os métodos esse valor parte de 125, valor que foi definido para que o ponto seja encontrado de forma mais rápida. Comparando os dois gráficos do PWM das figuras acima é possível perceber que o Condutância Incremental foi um pouco mais rápido para encontrar o MPP e que ao encontrar esse ponto se manteve um pouco mais estável em relação P&O.

Durante o teste foi simulado uma nuvem encobrendo temporariamente a placa para que pudesse perceber o desempenho dos controladores e observou-se que ambos reagiram rapidamente a variação de luz, buscando sempre o MPP.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou alguns princípios básicos sobre sistemas de geração de energia fotovoltaica, além de proporcionar o desenvolvimento de conhecimentos relativos ao uso de ferramentas, como o Labview NI, software que vem sendo extremamente utilizado para aplicações de instrumentação virtual tanto no âmbito acadêmico como comercial. Outra ferramenta que pôde ser explorado no desenvolver deste projeto foi a utilização do microcontrolador Arduino UNO, que tem sido muito utilizado para oferecer soluções rápidas e baratas para pequenas aplicações.

A implantação dos algoritmos de controle pode ser verificada com os resultados obtidos utilizando o Labview, com as aquisições feitas a partir do microcontrolador, identificação do ciclo de trabalho a partir do algoritmo de identificação de máxima potência e geração do sinal PWM. Todo o processo proposto de aquisição, condicionamento e tratamento dos sinais de entrada para fazer o controle foi concluído.

Com o resultado final dos dois algoritmos implementados foi possível fazer uma comparação e determinar qual dos dois seria o melhor método para buscar o MPPT de um painel fotovoltaico. Comparando os resultados obtidos percebeu-se que ambos os métodos foram eficazes pois atingiram o ponto de máxima potência como era o desejado. Porém duas diferenças podem ser destacadas em relação aos dois métodos, a primeira foi na velocidade para atingir o MPP, onde o Condutância Incremental foi um pouco mais rápido na identificação do ponto comparado ao P&O e a outra foi em relação a estabilidade ao atingir o MPP, onde o Condutância Incremental também foi mais estável. Com essas duas diferenças observadas, é possível dizer que o método Condutância Incremental é um pouco mais eficaz que o P&O, porém para realmente comprovar essa afirmação mais testes devem ser feitos e outras variáveis como temperatura e inclinação do painel devem ser observadas.

Como sugestões para trabalhos futuros, primeiramente, seria utilização de sensores mais eficazes nas aquisições das variáveis para que se obtenha um resultado mais confiável e que possa ser utilizado para aplicações maiores. Outro ponto seria fazer mais testes e avaliar outras variáveis que possam interferir nos resultados, como a temperatura e inclinação do painel. E por último utilizar outras técnicas de MPPT para comparação com as duas desenvolvidas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E., ROSA, A., DIAS, F., BRAZ, K., LANA, L., SANTO, O., & SACRAMENTO, T. (2012). ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. *Revista Brasileira de energia renovaveis*.
- Arduino. (2017). (Arduino) Acesso em 10 de 04 de 2017, disponível em <https://www.arduino.cc/>
- B, S., & PRADHAN, R. (1 de Janeiro de 2003). **A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems**. pp. 0-10.
- CASTRO, R. (2002). **Introdução à energia fotovoltaica**. Em *Energias Renováveis e Produção Descentralizada* . Lisboa.
- CRESESB. (s.d.). (CEPEL Sistemas Eletrobrás) Acesso em 04 de Abril de 2017, disponível em http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf
- DASH, S. (2014). **Comparative analysis of maximum power point (MPP) tracking techniques for solar PV application using MATLAB simulink**. *Internenational Conference on Recent Advances and Innovations in Engieering* .
- GAZOLI, J. R., & VILLALVA, M. G. (2012). **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica.
- HECKLER, R. (2012). **Comparativo das aplicações de Motores CC e Motores CA**.
- KRENZINGER, A. (2010). Acesso em 23 de Março de 2016, disponível em <http://www.abesrs.org.br/cursos/ciclo-debates-2010/palestra-arno-krenzinger.pdf>
- LOUREIRO, M. (2006). (Siemens LTDA) Acesso em 31 de Maio de 2017, disponível em www.siemens.com.br/motores
- NASCIMENTO, C. (2004). **Princípio do funcionamento da célula fotovoltaica** . Lavras.
- National Instruments. (s.d.). (NI) Acesso em 10 de Abril de 2017, disponível em <http://www.ni.com/getting-started/labview-basics/pt/environment>

PORTAL ENERGIA. (28 de Novembro de 2011). Acesso em 03 de Abril de 2017, disponível em <http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/>

ROCHA, R. (2016). **Desenvolvimento de uma unidade de controle de potência para satélites artificiais utilizando simultaneamente as estratégias MPPT e DET para o controle da energia transferida dos painéis fotovoltaicos para a carga útil e baterias**. Relatório técnico científico , Ouro Preto.

SILVEIRA, R. (s.d.). **Motor CC: Saiba como Funciona e de que forma Especificar**. (Citisystems) Acesso em 31 de Maio de 2017, disponível em <https://www.citisystems.com.br/motor-cc/>

ANEXOS

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

Plastic Medium-Power Complementary Silicon Transistors

Designed for general-purpose amplifier and low-speed switching applications.

Features

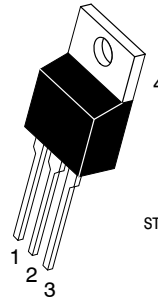
- High DC Current Gain –
 $h_{FE} = 2500$ (Typ) @ $I_C = 4.0$ Adc
- Collector–Emitter Sustaining Voltage – @ 100 mAdc
 $V_{CE(sus)} = 60$ Vdc (Min) – TIP120, TIP125
 $= 80$ Vdc (Min) – TIP121, TIP126
 $= 100$ Vdc (Min) – TIP122, TIP127
- Low Collector–Emitter Saturation Voltage –
 $V_{CE(sat)} = 2.0$ Vdc (Max) @ $I_C = 3.0$ Adc
 $= 4.0$ Vdc (Max) @ $I_C = 5.0$ Adc
- Monolithic Construction with Built–In Base–Emitter Shunt Resistors
- Pb–Free Packages are Available*



ON Semiconductor®

www.onsemi.com

DARLINGTON 5 AMPERE COMPLEMENTARY SILICON POWER TRANSISTORS 60–80–100 VOLTS, 65 WATTS



TO-220AB
CASE 221A
STYLE 1

STYLE 1:
PIN 1. BASE
2. COLLECTOR
3. EMITTER
4. COLLECTOR

MARKING DIAGRAM



TIP12x = Device Code
x = 0, 1, 2, 5, 6, or 7
A = Assembly Location
Y = Year
WW = Work Week
G = Pb–Free Package

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 3 of this data sheet.

*For additional information on our Pb–Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TIP120, TIP125	TIP121, TIP126	TIP122, TIP127	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	60	80	100	Vdc
Collector–Base Voltage	V_{CB}	60	80	100	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EB}	5.0			Vdc
Collector Current – Continuous – Peak	I_C	5.0 8.0			Adc
Base Current	I_B	120			mAdc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	65 0.52			W W/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	2.0 0.016			W W/ $^\circ\text{C}$
Unclamped Inductive Load Energy (Note 1)	E	50			mJ
Operating and Storage Junction, Temperature Range	T_J, T_{stg}	–65 to +150			$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction–to–Case	$R_{\theta JC}$	1.92	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Thermal Resistance, Junction–to–Ambient	$R_{\theta JA}$	62.5	$^\circ\text{C}/\text{W}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

1. $I_C = 1\text{ A}$, $L = 100\text{ mH}$, P.R.F. = 10 Hz, $V_{CC} = 20\text{ V}$, $R_{BE} = 100\ \Omega$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Collector–Emitter Sustaining Voltage (Note 2) ($I_C = 100\text{ mAdc}$, $I_B = 0$)	TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127	$V_{CEO(sus)}$	60 80 100	– – –	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 30\text{ Vdc}$, $I_B = 0$) ($V_{CE} = 40\text{ Vdc}$, $I_B = 0$) ($V_{CE} = 50\text{ Vdc}$, $I_B = 0$)	TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127	I_{CEO}	– – –	0.5 0.5 0.5	mAdc
Collector Cutoff Current ($V_{CB} = 60\text{ Vdc}$, $I_E = 0$) ($V_{CB} = 80\text{ Vdc}$, $I_E = 0$) ($V_{CB} = 100\text{ Vdc}$, $I_E = 0$)	TIP120, TIP125 TIP121, TIP126 TIP122, TIP127	I_{CBO}	– – –	0.2 0.2 0.2	mAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{BE} = 5.0\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)		I_{EBO}	–	2.0	mAdc

ON CHARACTERISTICS (Note 2)

DC Current Gain ($I_C = 0.5\text{ Adc}$, $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$) ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$)		h_{FE}	1000 1000	– –	–
Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $I_B = 12\text{ mAdc}$) ($I_C = 5.0\text{ Adc}$, $I_B = 20\text{ mAdc}$)		$V_{CE(sat)}$	– –	2.0 4.0	Vdc
Base–Emitter On Voltage ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 3.0\text{ Vdc}$)		$V_{BE(on)}$	–	2.5	Vdc

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Small–Signal Current Gain ($I_C = 3.0\text{ Adc}$, $V_{CE} = 4.0\text{ Vdc}$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		h_{fe}	4.0	–	–
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ Vdc}$, $I_E = 0$, $f = 0.1\text{ MHz}$)	TIP125, TIP126, TIP127 TIP120, TIP121, TIP122	C_{ob}	– –	300 200	pF

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

2. Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

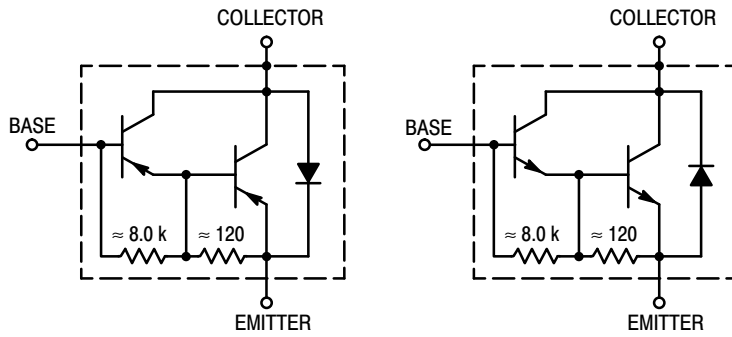


Figure 1. Darlington Circuit Schematic

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
TIP120	TO-220	50 Units / Rail
TIP120G	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail
TIP121	TO-220	50 Units / Rail
TIP121G	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail
TIP122	TO-220	50 Units / Rail
TIP122G	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail
TIP125	TO-220	50 Units / Rail
TIP125G	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail
TIP126	TO-220	50 Units / Rail
TIP126G	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail
TIP127	TO-220	50 Units / Rail
TIP127G	TO-220 (Pb-Free)	50 Units / Rail

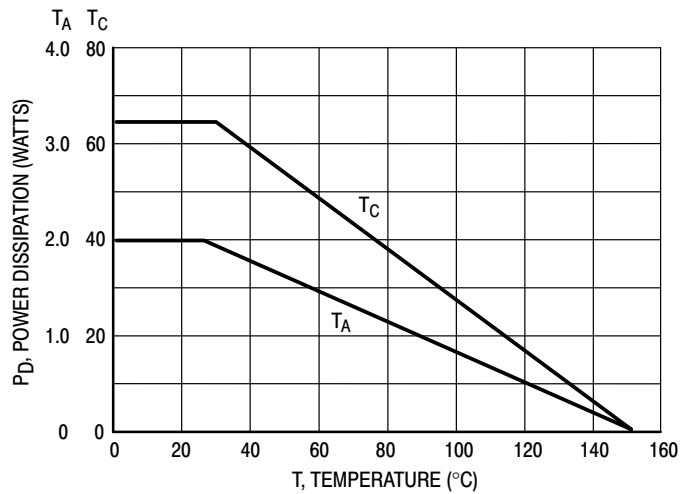


Figure 2. Power Derating

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

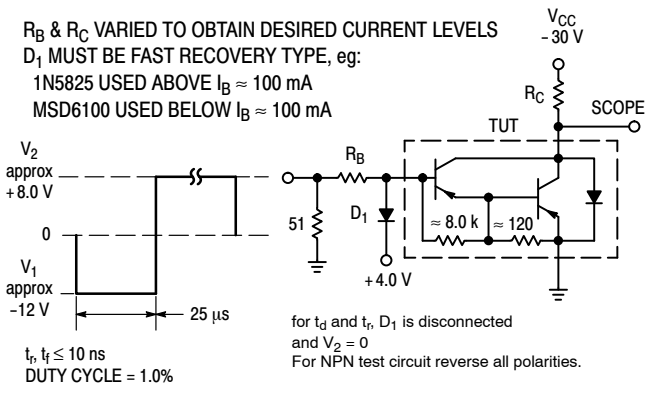


Figure 3. Switching Times Test Circuit

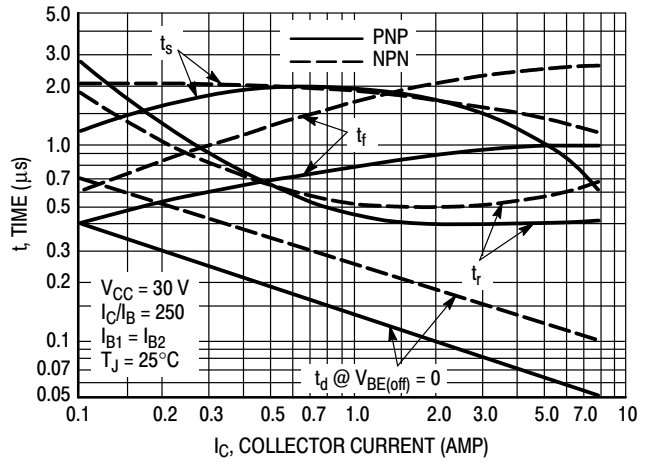


Figure 4. Switching Times

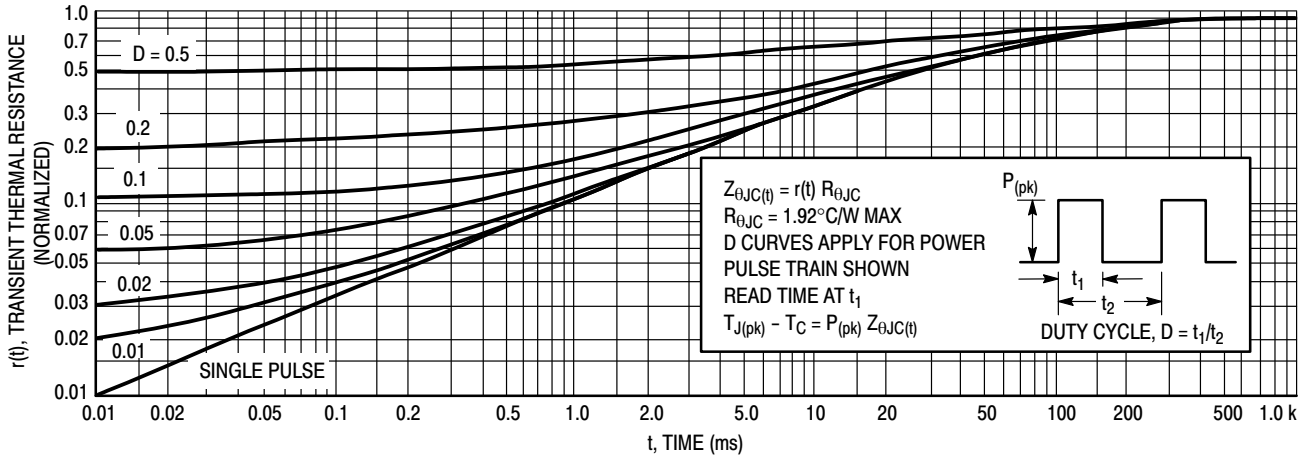


Figure 5. Thermal Response

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

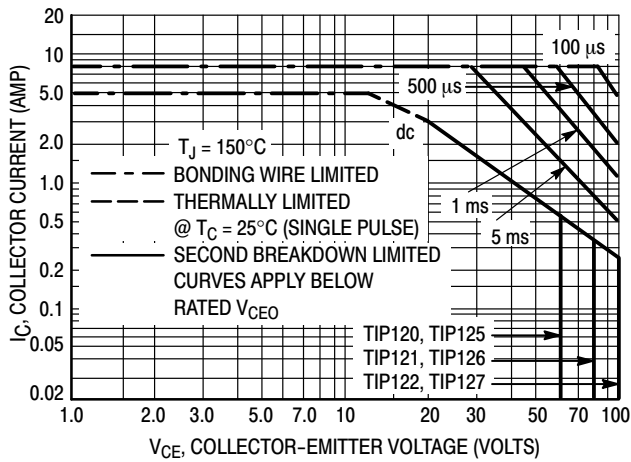


Figure 6. Active-Region Safe Operating Area

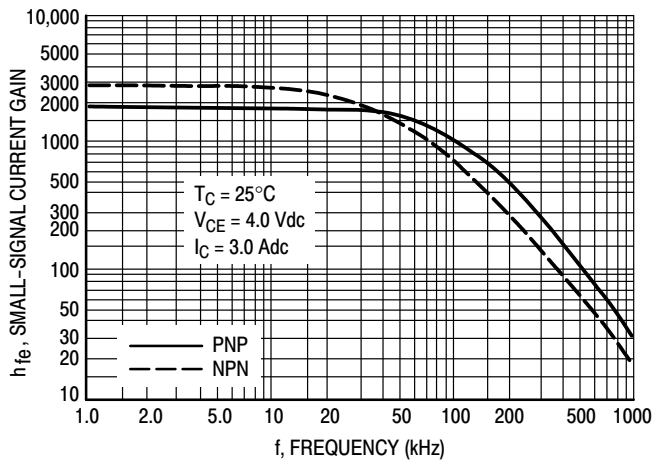


Figure 7. Small-Signal Current Gain

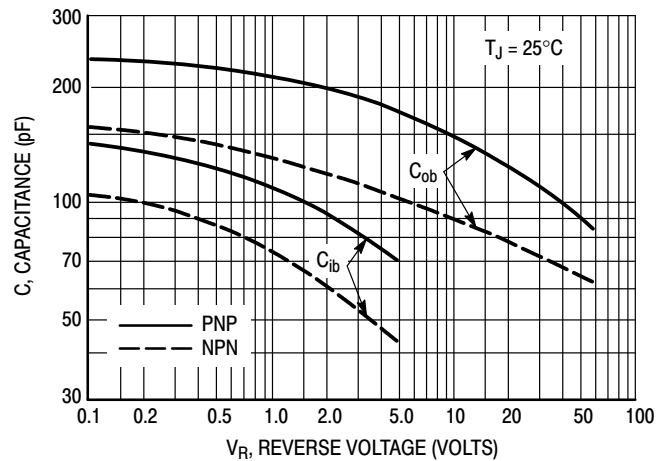


Figure 8. Capacitance

There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate $I_C - V_{CE}$ limits of the transistor that must be observed for reliable operation, i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 6 is based on $T_{J(pk)} = 150^\circ\text{C}$; T_C is variable depending on conditions. Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10% provided $T_{J(pk)} < 150^\circ\text{C}$. $T_{J(pk)}$ may be calculated from the data in Figure 5. At high case temperatures, thermal limitations will reduce the power that can be handled to values less than the limitations imposed by second breakdown

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

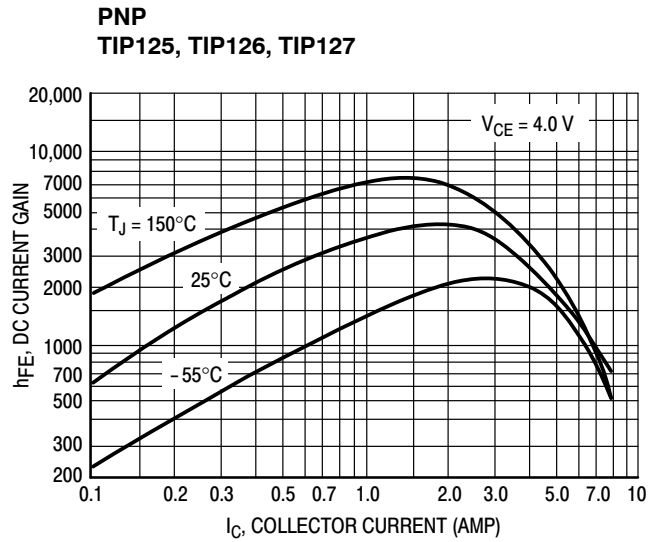
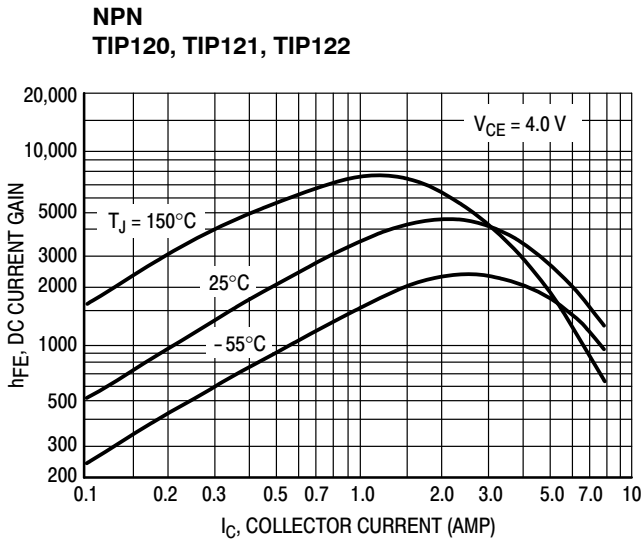


Figure 9. DC Current Gain

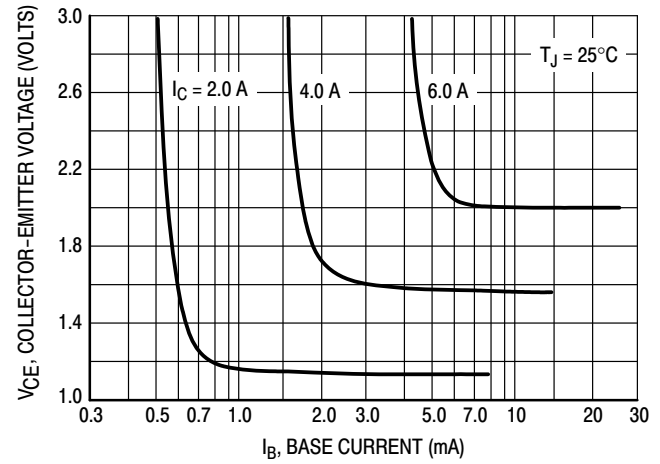
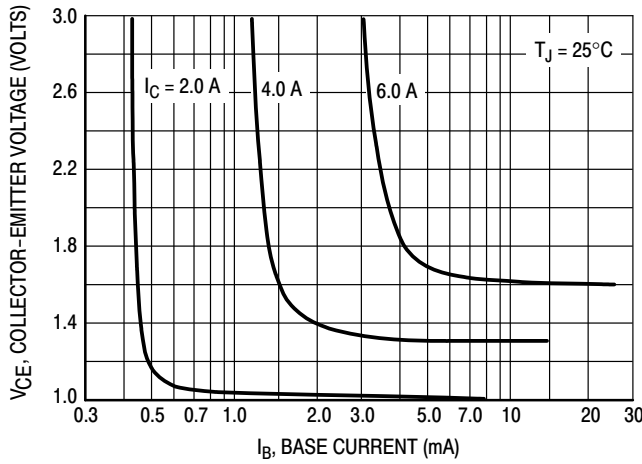


Figure 10. Collector Saturation Region

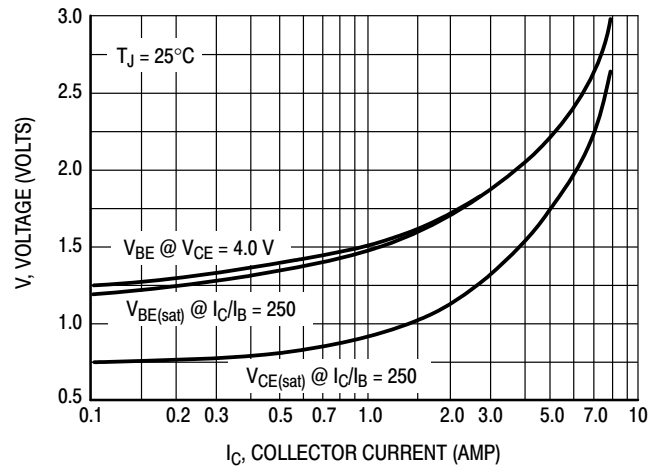
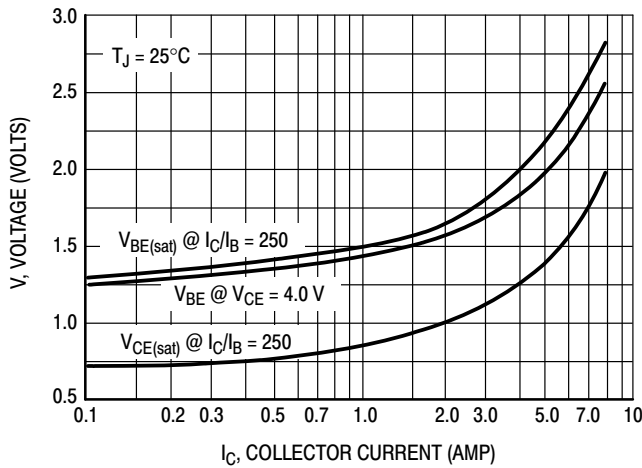
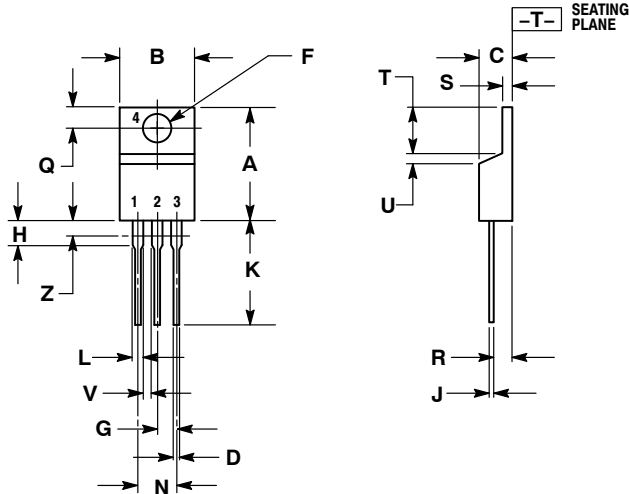


Figure 11. "On" Voltages

TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220 CASE 221A-09 ISSUE AH



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION Z DEFINES A ZONE WHERE ALL BODY AND LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.570	0.620	14.48	15.75
B	0.380	0.415	9.66	10.53
C	0.160	0.190	4.07	4.83
D	0.025	0.038	0.64	0.96
F	0.142	0.161	3.61	4.09
G	0.095	0.105	2.42	2.66
H	0.110	0.161	2.80	4.10
J	0.014	0.024	0.36	0.61
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.15	1.52
N	0.190	0.210	4.83	5.33
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.15	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.47
U	0.000	0.050	0.00	1.27
V	0.045	---	1.15	---
Z	---	0.080	---	2.04

STYLE 1:

- PIN 1: BASE
2. COLLECTOR
3. EMITTER
4. COLLECTOR

ON Semiconductor and the are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC) or its subsidiaries in the United States and/or other countries. SCILLC owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of SCILLC's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf. SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative



IRF740

N - CHANNEL 400V - 0.48 Ω - 10 A - TO-220 PowerMESH™ MOSFET

TYPE	V _{DSS}	R _{DS(on)}	I _D
IRF740	400 V	< 0.55 Ω	10 A

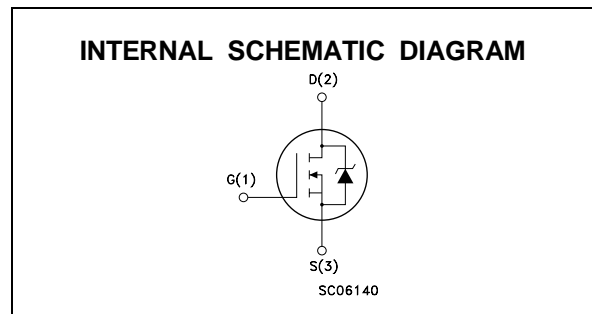
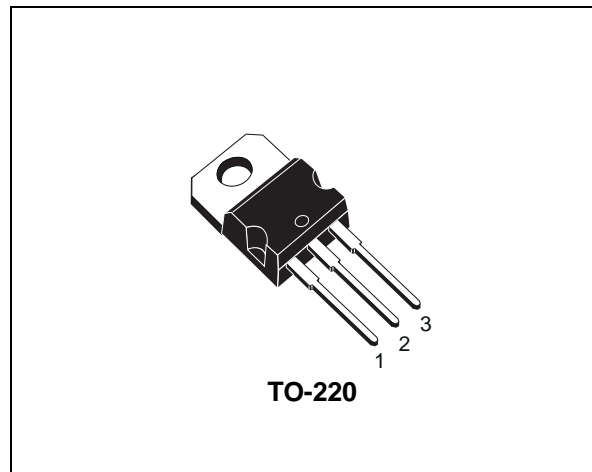
- TYPICAL R_{DS(on)} = 0.48 Ω
- EXTREMELY HIGH dv/dt CAPABILITY
- 100% AVALANCHE TESTED
- VERY LOW INTRINSIC CAPACITANCES
- GATE CHARGE MINIMIZED

DESCRIPTION

This power MOSFET is designed using the company's consolidated strip layout-based MESH OVERLAY™ process. This technology matches and improves the performances compared with standard parts from various sources.

APPLICATIONS

- HIGH CURRENT SWITCHING
- UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY (UPS)
- DC/DC CONVERTERS FOR TELECOM, INDUSTRIAL, AND LIGHTING EQUIPMENT.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _{DS}	Drain-source Voltage (V _{GS} = 0)	400	V
V _{DGR}	Drain- gate Voltage (R _{GS} = 20 kΩ)	400	V
V _{GS}	Gate-source Voltage	± 20	V
I _D	Drain Current (continuous) at T _c = 25 °C	10	A
I _D	Drain Current (continuous) at T _c = 100 °C	6.3	A
I _{DM} (*)	Drain Current (pulsed)	40	A
P _{tot}	Total Dissipation at T _c = 25 °C	125	W
	Derating Factor	1.0	W/°C
dv/dt(1)	Peak Diode Recovery voltage slope	4.0	V/ns
T _{stg}	Storage Temperature	-65 to 150	°C
T _j	Max. Operating Junction Temperature	150	°C

(*) Pulse width limited by safe operating area

(1) I_{SD} ≤ 10 A, di/dt ≤ 120 A/μs, V_{DD} ≤ V_{(BR)DSS}, T_j ≤ T_{JMAX}

First Digit of the Datecode Being Z or K Identifies Silicon Characterized in this Datasheet

IRF740

THERMAL DATA

R _{thj-case}	Thermal Resistance Junction-case	Max	1.0	°C/W
R _{thj-amb}	Thermal Resistance Junction-ambient	Max	62.5	°C/W
R _{thc-sink}	Thermal Resistance Case-sink	Typ	0.5	°C/W
T _l	Maximum Lead Temperature For Soldering Purpose		300	°C

AVALANCHE CHARACTERISTICS

Symbol	Parameter	Max Value	Unit
I _{AR}	Avalanche Current, Repetitive or Not-Repetitive (pulse width limited by T _j max)	10	A
E _{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (starting T _j = 25 °C, I _D = I _{AR} , V _{DD} = 50 V)	520	mJ

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_{case} = 25 °C unless otherwise specified)

OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _{(BR)DSS}	Drain-source Breakdown Voltage	I _D = 250 μA V _{GS} = 0	400			V
I _{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current (V _{GS} = 0)	V _{DS} = Max Rating V _{DS} = Max Rating T _c = 125 °C			1 50	μA μA
I _{GSS}	Gate-body Leakage Current (V _{DS} = 0)	V _{GS} = ± 20 V			± 100	nA

ON (*)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	V _{DS} = V _{GS} I _D = 250 μA	2	3	4	V
R _{DS(on)}	Static Drain-source On Resistance	V _{GS} = 10V I _D = 5.3 A		0.48	0.55	Ω
I _{D(on)}	On State Drain Current	V _{DS} > I _{D(on)} × R _{DS(on)max} V _{GS} = 10 V	10			A

DYNAMIC

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
g _{fs} (*)	Forward Transconductance	V _{DS} > I _{D(on)} × R _{DS(on)max} I _D = 6 A	5.8			S
C _{iss}	Input Capacitance	V _{DS} = 25 V f = 1 MHz V _{GS} = 0		1400		pF
C _{oss}	Output Capacitance			220		pF
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance			27		pF

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

SWITCHING ON

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{d(on)}$	Turn-on Time	$V_{DD} = 200\text{ V}$ $I_D = 5\text{ A}$ $R_G = 4.7\ \Omega$ $V_{GS} = 10\text{ V}$ (see test circuit, figure 3)		17		ns
t_r	Rise Time			10		ns
Q_g	Total Gate Charge	$V_{DD} = 320\text{ V}$ $I_D = 10.7\text{ A}$ $V_{GS} = 10\text{ V}$		35	43	nC
Q_{gs}	Gate-Source Charge			11		nC
Q_{gd}	Gate-Drain Charge			12		nC

SWITCHING OFF

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$t_{r(off)}$	Off-voltage Rise Time	$V_{DD} = 320\text{ V}$ $I_D = 10\text{ A}$ $R_G = 4.7\ \Omega$ $V_{GS} = 10\text{ V}$ (see test circuit, figure 5)		10		ns
t_f	Fall Time			10		ns
t_c	Cross-over Time			17		ns

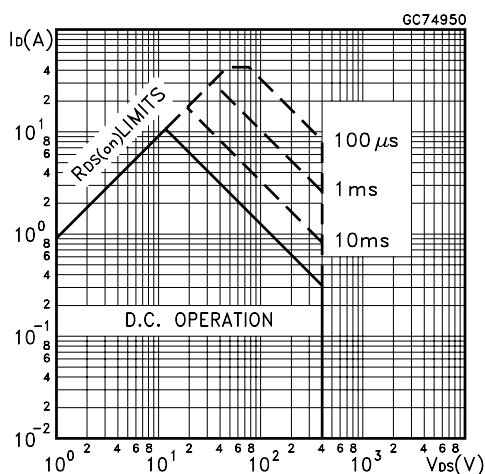
SOURCE DRAIN DIODE

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{SD}	Source-drain Current				10	A
$I_{SDM}(\bullet)$	Source-drain Current (pulsed)				40	A
$V_{SD}(\ast)$	Forward On Voltage	$I_{SD} = 10\text{ A}$ $V_{GS} = 0$			1.6	V
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_{SD} = 10\text{ A}$ $di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$ $V_{DD} = 100\text{ V}$ $T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$ (see test circuit, figure 5)		370		ns
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge			3.2		μC
I_{RRM}	Reverse Recovery Current			17		A

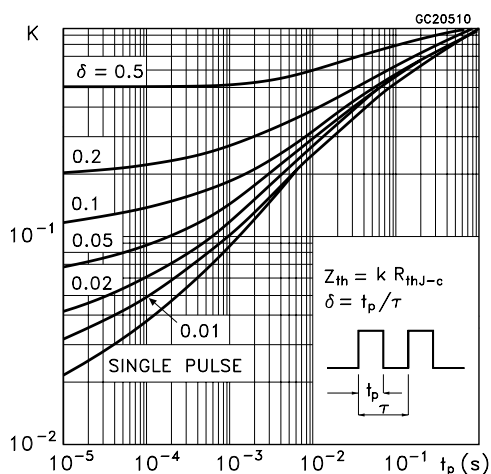
(*) Pulsed: Pulse duration = 300 μs , duty cycle 1.5 %

(•) Pulse width limited by safe operating area

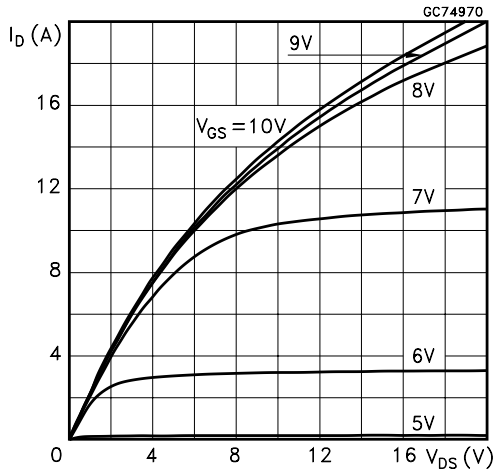
Safe Operating Area



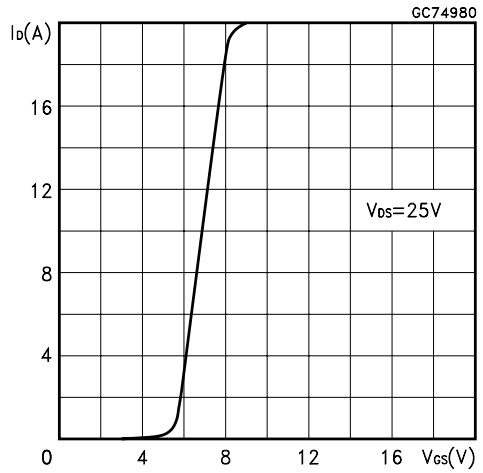
Thermal Impedance



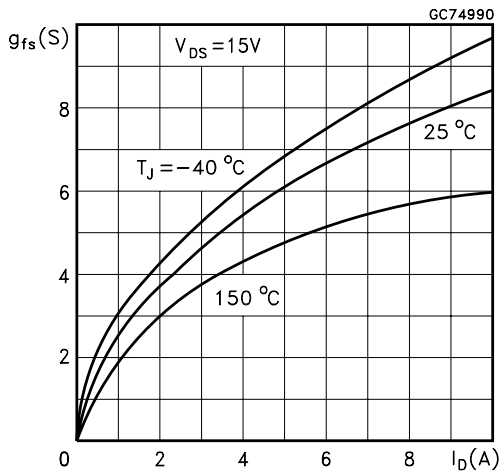
Output Characteristics



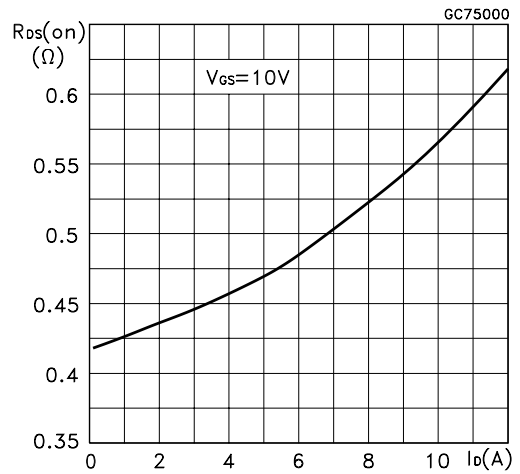
Transfer Characteristics



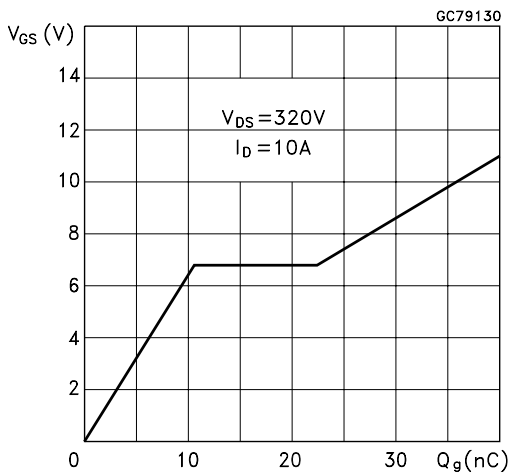
Transconductance



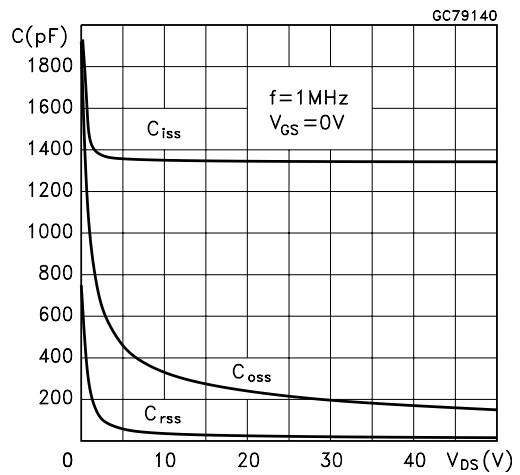
Static Drain-source On Resistance



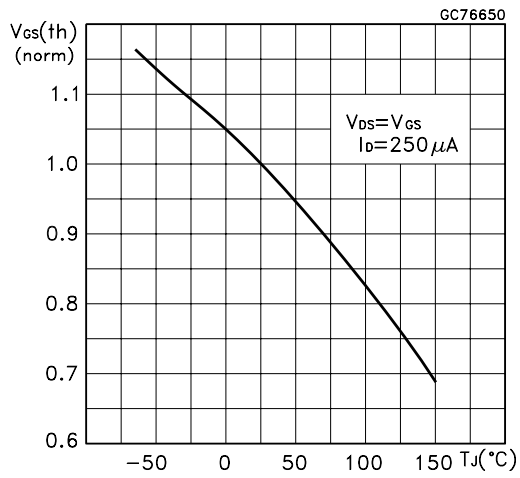
Gate Charge vs Gate-source Voltage



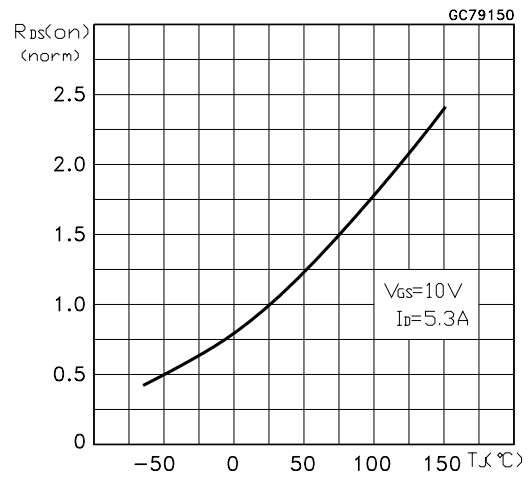
Capacitance Variations



Normalized Gate Threshold Voltage vs Temperature



Normalized On Resistance vs Temperature



Source-drain Diode Forward Characteristics

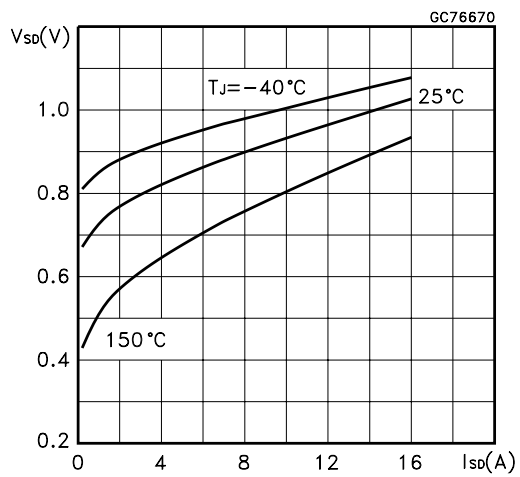


Fig. 1: Unclamped Inductive Load Test Circuit

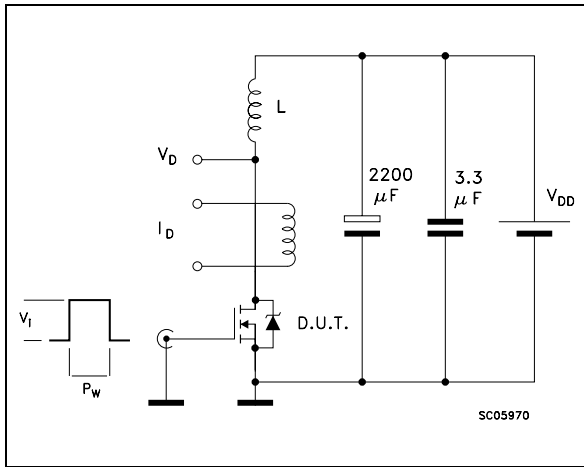


Fig. 1: Unclamped Inductive Waveform

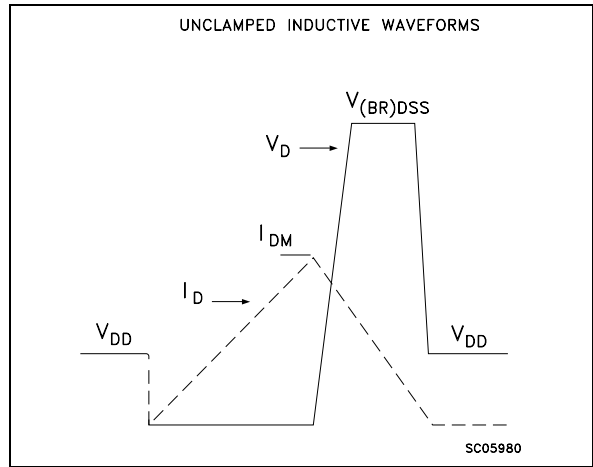


Fig. 3: Switching Times Test Circuits For Resistive Load

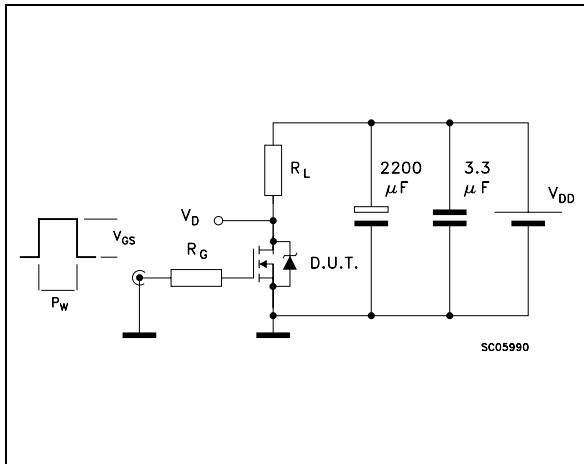


Fig. 4: Gate Charge test Circuit

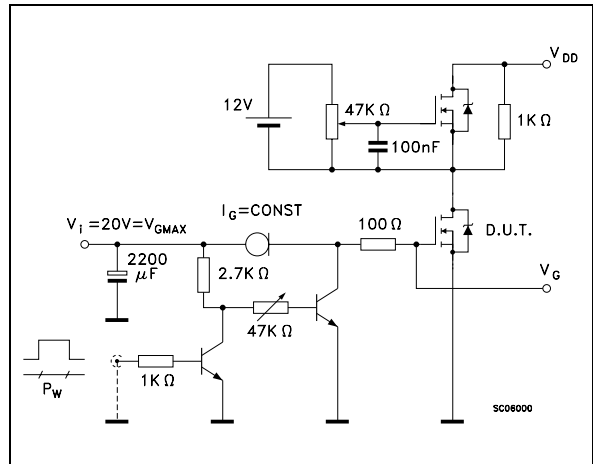
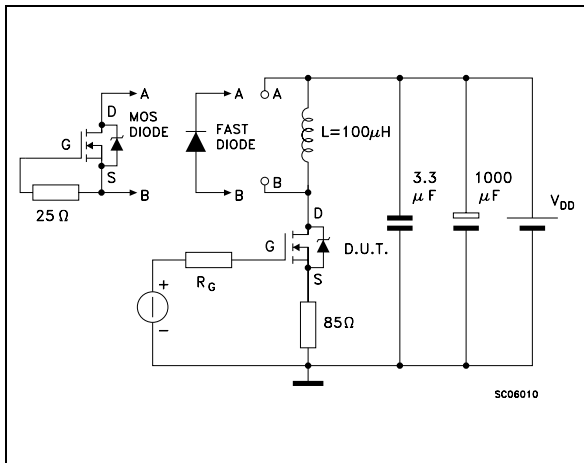
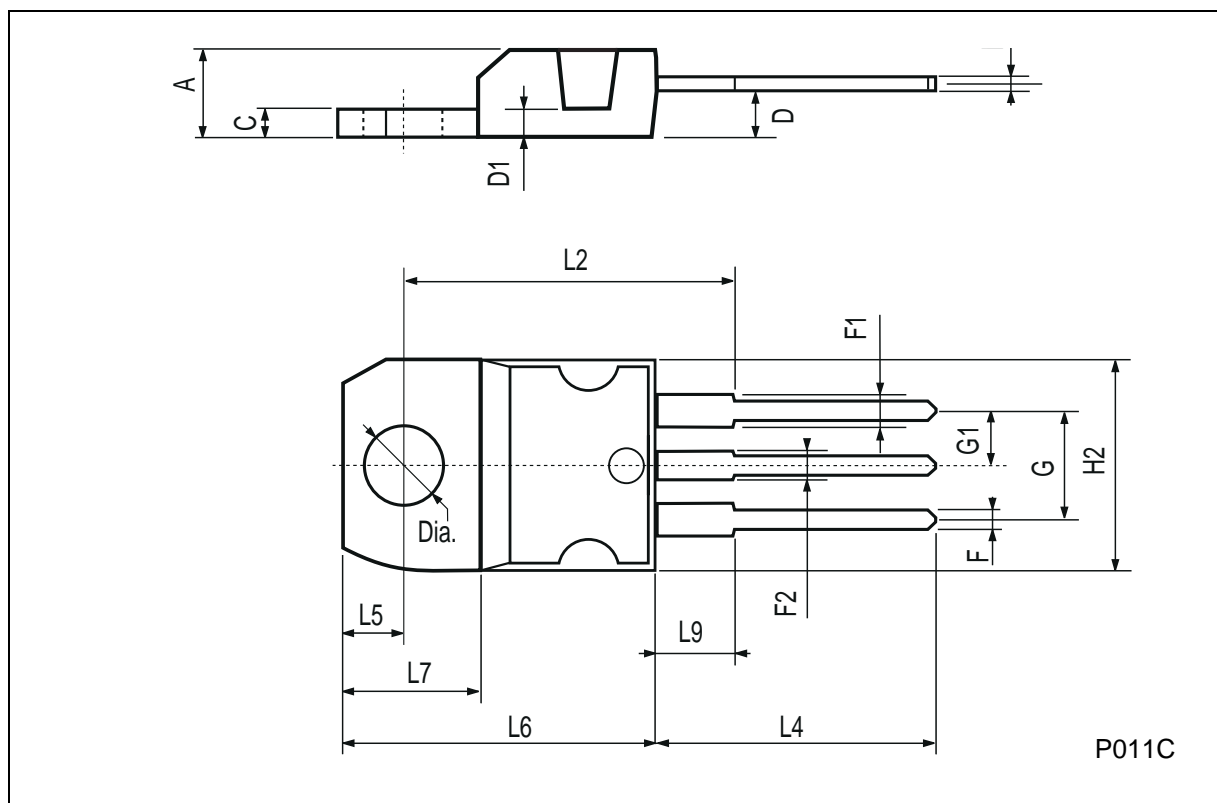


Fig. 5: Test Circuit For Inductive Load Switching And Diode Recovery Times



TO-220 MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
C	1.23		1.32	0.048		0.051
D	2.40		2.72	0.094		0.107
D1		1.27			0.050	
E	0.49		0.70	0.019		0.027
F	0.61		0.88	0.024		0.034
F1	1.14		1.70	0.044		0.067
F2	1.14		1.70	0.044		0.067
G	4.95		5.15	0.194		0.203
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H2	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16.4			0.645	
L4	13.0		14.0	0.511		0.551
L5	2.65		2.95	0.104		0.116
L6	15.25		15.75	0.600		0.620
L7	6.2		6.6	0.244		0.260
L9	3.5		3.93	0.137		0.154
DIA.	3.75		3.85	0.147		0.151



Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specification mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 1998 STMicroelectronics – Printed in Italy – All Rights Reserved

STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - France - Germany - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Mexico - Morocco - The Netherlands - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A.

<http://www.st.com>

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.