



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO APLICADA AO ESTUDO DA ATIVIDADE SOLAR

Rodrigo Trindade de Menezes

Relatório referente a bolsa PI-BIC/CNPq no período de Janeiro a Julho de 2017 sob a orientação de Dr. Luís Eduardo Antunes Vieira e Dra. Flavia Reis Cardoso.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/>>

INPE
São José dos Campos
2017



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO APLICADA AO ESTUDO DA ATIVIDADE SOLAR

Rodrigo Trindade de Menezes

Relatório referente a bolsa PI-BIC/CNPq no período de Janeiro a Julho de 2017 sob a orientação de Dr. Luís Eduardo Antunes Vieira e Dra. Flavia Reis Cardoso.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Menezes, Rodrigo Trindade.

Desenvolvimento de instrumentação aplicada ao estudo da atividade solar / Rodrigo Trindade de Menezes. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xiv + 47 p. ; ()

Relatório (Iniciação Científica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, .

Vieira, L.E.A, Cardoso, F.R : Luís Eduardo Antunes Vieira, Flavia Reis Cardoso.

1. Radiação. 2. Radiômetro 3. Sol. 4. TSI. 5. Clima I. Título.

CDU



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Iniciação Científica

AGRADECIMENTOS

Devo agradecer à minha orientadora Flavia Reis Cardoso, pelo apoio, por todas as oportunidades oferecidas e principalmente pela paciência em corrigir todos os erros no presente trabalho. Não posso esquecer também de agradecer ao Prof. Carlos Yujiro Shigue por todo o suporte e orientação enquanto eu ainda estava dando os meus primeiros passos como graduando e como entusiasta de eletrônica e programação, o que foi fundamental não somente para a minha graduação mas para a minha vida. Agradeço também o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico, processo 103232/2017-6.

RESUMO

A atividade solar pode ser correlacionada com o aparecimento de manchas (sunspots), que são regiões escuras na superfície do disco solar. O número de manchas apresenta periodicidade aproximada de 11 anos entre dois picos de intensidade consecutivos. Essas manchas são resultado de fortes campos magnéticos que inibem o processo de convecção do plasma, diminuindo localmente a temperatura. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um radiômetro solar para o estudo da radiação solar e sua influência no clima terrestre. Alguns instrumentos, como o TIM (Total Irradiance Monitor) e o TSIM (Total Solar Irradiance Monitor), foram construídos para medir a radiação solar no espaço e funcionam pelo princípio da substituição elétrica, ou seja, a medida da potência da radiação é realizada indiretamente pelo monitoramento da potência elétrica dissipada. O radiômetro desenvolvido nesse trabalho realiza medidas em solo, embora funcione similarmente aos instrumentos TIM e TSIM. O instrumento possui dois compartimentos com pastilhas de alumínio, onde um deles é exposto ao sol e o outro é mantido em ambiente escuro. A temperatura de referência vem da primeira pastilha, exposta a radiação solar. A segunda pastilha, isolada da luz do Sol, é aquecida de forma a igualar a temperatura da primeira. Com isso, por meio do princípio da substituição elétrica, podemos determinar a potência da radiação solar em função da potência utilizada para aquecer a segunda pastilha. O radiômetro foi construído utilizando a plataforma Arduino, devido à facilidade para aquisição e transmissão de dados. Foram elaborados circuitos de alimentação, drivers de potência, circuitos de conversão de sinais e um sistema para transmissão de dados via rádio frequência. Os dados foram processados utilizando algoritmos em Python. Com a atual configuração do equipamento, foi possível realizar diversas medidas com uma precisão satisfatória para a condição de céu limpo. Alcançou-se uma precisão de controle da temperatura entre as câmaras do instrumento nas melhores medidas de 99,94%. Nos próximos passos, pretendemos implementar melhorias no processo de funcionamento do instrumento, como na dissipação de calor do radiômetro e no desenvolvimento de um rastreador solar.

Palavras-chave: Irradiação Solar. Radiômetro. Sol. Clima. Instrumentação.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Nessa imagem tem-se a nebulosa da Aranha Vermelha. Nebulosas são os berçários de estrelas. Fonte: Mellema (2016)	1
1.2 Estrutura geral do Sol. Fonte: Mellema (2016)	2
1.3 Nessa imagem tem-se uma mancha solar. A parte escura central é a umbra e a parte estriada radial é a penumbra. As manchas menores em volta são células granulares de convecção. Fonte: Solanki (2003)	4
1.4 Superposição dos dados provenientes de vários instrumentos. Esses dados se correlacionam com o número de manchas solares, deixando evidente o ciclo de atividade solar de 11 anos. Fonte: Kopp et al. (2012)	5
1.5 Absorção da radiação solar na atmosfera terrestre. Fonte: Woods et al. (2000)	6
1.6 Balanço de energia terrestre. Todas as unidades são dadas em Wm^{-2} . Fonte: Woods et al. (2000)	7
1.7 Os três radiômetros dentro da estrutura do instrumento. Fonte: Fang et al. (2014)	10
1.8 Desenho esquemático do radiômetro. Fonte: Fang et al. (2014)	11
1.9 Diagrama de blocos do circuito do TSIM. Fonte: Fang et al. (2014)	12
1.10 Configuração básica de um TBJ. Adaptado de Boylestad et al. (2002)	13
1.11 Configuração de emissor comum para TBJ. Adaptado de Filadelfo (2016)	14
1.12 Esquema reduzido de um amplificador operacional. Adaptado de Boylestad et al. (2002)	15
1.13 Amplificador operacional em configuração não inversora. Adaptado de Boylestad et al. (2002)	15
1.14 Sistema com loop fechado. O controlador e o sistema formam um sistema com feedback Fonte: Aström and Murray (2010)	16
1.15 Diagrama de blocos de um controlador PID simples. Adaptado de Aström and Murray (2010)	17
1.16 Gráfico representando como um controlador PID atua sobre o erro. Adaptado de Aström and Murray (2010)	18
1.17 Comportamento de um controlador PID com o <i>setpoint</i> em azul e com diferentes ajustes em k_i , k_p e k_d foram mantidos constantes. Adaptado de Wikipedia ()	18
1.18 Método gráfico para a obtenção dos parâmetros do PID. Adaptado de Aström and Murray (2010)	19

3.1	Comportamento da pastilha de alumínio quando exposta à luz sol.	25
3.2	Fonte de tensão do instrumento.	27
3.3	Circuito de controle desenvolvido em torno do ATmega328p.	28
3.4	Driver de potência. A construção do driver foi necessária devido às limitação do microncontrolador.	29
3.5	Circuitos montados em um placa perfurada de fenolite.	31
3.6	Fotos da estrutura do radiômetro.	32
3.7	Radiômetro completamente montado com todos os termistores.	33
3.8	Gráfico utilizado na calibração do instrumento. Primeiro patamar a 1.95V e segundo patamar a 2.44V.	34
4.1	Aquecimento dos componente LM7815 e BD137 quando o instrumento opera em potencia máxima.	37
4.2	Vizualização detalhada da Figura 4.1 para o LM7815.	38
4.3	Teste da calibração manual, com setpoint em amarelo.	39
4.4	Teste da calibração com o método Cohen-Coon, com setpoint em amarelo.	39
4.5	Região das medições utilizada para o cálculo da radiação solar. Céu parcialmente nublado.	41
4.6	Região das medições utilizada para o cálculo da radiação solar. Céu completamente nublado.	42

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>	
1.1	O TPA é fluxo de ondas longas no topo da atmosfera e o SPF é o fluxo na superfície. F_d é o fluxo descendente e F_a o fluxo ascendente. Adaptado de Kiehl and Trenberth (1997)	8
1.2	Estimativas do balanço de energia terrestre para diversas fontes, com albedos próximos as 30 %. Aqui OC e OL SÃO a diferença da radiação das ondas, longas e curtas respectivamente, com direção ascendente e descendente na superfície. SH é o calor específico da superfície e LH é o calor latente da superfície. Albedo é o albedo planetário em porcentagem. Fontes: a = National Academy of Sciences (1975), b = Budyko (1982), c = Paltridge and Platt (1976), d = Hartmann (1994), e = Ramanathan (1987), f = Schneider (1987), g = Liou (1992), h = Peixoto and Oort (1992), i = MacCracken (1985), j = Henderson-Sellers and Robinson (1986), k = Present study, l = Rossow and Zhang (1995), m = Ohmura and Gilgen (1993). Adaptado de Kiehl and Trenberth (1997)	8
3.1	Características das pastilhas de alumínio, onde P_1 é a pastilha da câmara clara e P_2 a pastilha da câmara escura. *Valores médios	24
3.2	Valores medidos de área.	25
3.3	Parâmetros estabelecidos arbitrariamente.	33
3.4	Dados para utilização do método Cohen-Coon e parâmetros obtidos.	34
4.1	Parâmetros PID para os dois testes realizados.	40
4.2	Medições da radiação local. Todas as medições foram realizadas entre as 12-13h com duração mínima de 20 minutos. Na última coluna L quer dizer céu limpo, PN parcialmente nublado e N completamente nublado.	40

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Fundamentação Teórica	1
1.1 Surgimento do Sol	1
1.2 O Interior do Sol	1
1.3 A Atmosfera Solar	2
1.3.1 A fotosfera	2
1.3.2 A Cromosfera	3
1.3.3 Coroa	3
1.4 Manchas solares e TSI	3
1.5 Balanço Anual de Energia Terrestre	5
1.6 Medições da TSI	9
1.7 Eletrônica	13
1.7.1 Polarização de Transistores	13
1.7.2 Amplificadores Operacionais	14
1.8 Controle	16
1.8.1 Sistemas com Feedback	16
1.8.1.1 Controladores PID	16
1.8.1.2 Método Cohen-Coon	19
2 Objetivos	21
3 Materiais e Métodos	23
3.1 O Radiômetro	23
3.2 Medições Preliminares	24
3.3 Modo de Operação	25
3.4 Aquisição de Dados	26
3.5 Fonte de Alimentação	26
3.6 Controle do Sistema	27
3.7 Driver de Potência	29
3.8 Estrutura e Placa de Circuitos	30
3.9 Calibração	33
3.10 Medições e Análise dos Dados	34
4 Resultados e Discussão	37

4.1	Aquecimento dos Componentes	37
4.2	Calibrações	38
4.3	Medições de Radiação	40
5	CONCLUSÕES	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 Fundamentação Teórica

1.1 Surgimento do Sol

Apesar da teoria de formação das estrelas possuir diversas lacunas, é bem sabido que as estrelas, inclusive o Sol, surgem em regiões no espaço chamadas de nebulosas. As nebulosas são gigantescas nuvens formadas principalmente por hidrogênio a temperaturas entre 10-50K (LADA, 2005). Uma nebulosa pode ser vista na Figura 1.1. Nas regiões mais internas dessa nuvem, tem-se a formação de núcleos superdensos através de aglutinação progressiva de matéria, o que gera regiões com alta gravidade. Em um determinado momento, por conta da aglutinação progressiva, os núcleos adquirem níveis tão altos de gravidade, pressão e temperatura que os núcleos de hidrogênio começam a fundir-se, criando assim, deutério, trítio e também núcleos de hélio (MILONE et al., 2003). Em um determinado momento a massa do núcleo superdenso atinge o equilíbrio hidrostático e a taxa de fusão de hidrogênio se estabiliza, é nesse momento que se dá o surgimento de uma nova estrela.



Figura 1.1 - Nessa imagem tem-se a nebulosa da Aranha Vermelha. Nebulosas são os berçários de estrelas. Fonte: Mellema (2016)

1.2 O Interior do Sol

O Sol basicamente se divide em duas partes, o interior, que é subdividido em núcleo, camada radiativa e camada convectiva, e a atmosfera, que é subdividida em fotosfera, cromosfera e coroa. A subdivisão do Sol pode ser observada na Figura 1.2. No núcleo do Sol ocorrem as fusões nucleares e, portanto, a geração da energia solar. Na camada

seguinte, a camada radiativa, a transferência de calor ocorre predominantemente por radiação, e na camada superficial, a camada convectiva, o principal processo de transporte de calor é a convecção.

Na camada convectiva, as porções mais internas emergem, por fluxo convectivo, atingindo a “superfície”, onde perdem energia e esfriam. Ao esfriar, esse plasma se torna mais denso e retorna a partes mais profundas da camada. Todo esse processo, causa o aparecimento de células de convecção na “superfície” solar, como pode-se ver pela Imagem 1.2.

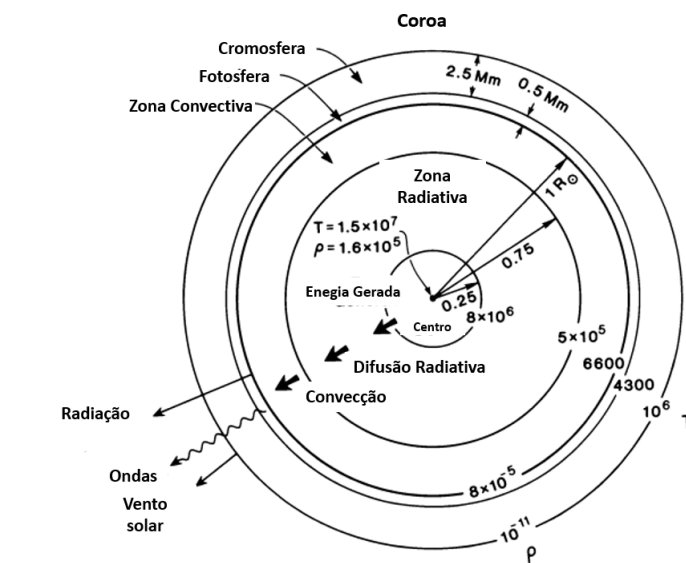


Figura 1.2 - Estrutura geral do Sol. Fonte: Mellema (2016)

1.3 A Atmosfera Solar

1.3.1 A fotosfera

A fotosfera é a parte visível do Sol. A maior parte das medições feitas são referentes a essa camada (SOLANKI, 2003). É da fotosfera que vem a maior parte da luz visível (MILONE et al., 2003). Primeiramente isso se dá pela sua alta temperatura, entre 4500K e 6000K (NASA, 1999), tornando-a uma potente fonte térmica de radiação. Segundo, a cromosfera e a coroa são transparentes no espectro visível e a fotosfera é relativamente opaca, não permitindo a visualização do interior do Sol. É nessa camada também que ocorre um fenômeno muito estudado atualmente, as manchas solares, que será discutido posteriormente na Seção 1.4.

1.3.2 A Cromosfera

A cromosfera é provavelmente a parte menos compreendida do sol, devido à grande heterogeneidade do comportamento do plasma nessa região (HEINZEL et al., 2008). As temperaturas na cromosfera podem variar entre 3800K até cerca de 6000K (AVRETT, 2003). As observações realizadas dessa camada são frequentemente realizadas a partir de telescópios ópticos e com o auxílio de filtros especiais, como o H- α ou o C_a II (HEINZEL et al., 2008). Essas observações mostram diversas estruturas cromosféricas: proeminências, praias brilhantes, filamentos, fáculas, “plages” e espículos (MILONE et al., 2003).

As proeminências são uma espécie de tubo de plasma que se erguem do limbo (contorno de disco solar) e são responsáveis por uma grande parcela das ejeções de massa coronal (MILONE et al., 2003). As proeminências podem ser classificadas entre calmas e ativas: a primeira localizada próxima a regiões ativas e a segunda está associada a precipitações de arcos magnéticos.

1.3.3 Coroa

Entre a coroa e a cromosfera existe uma região de transição, na qual as temperaturas variam de forma abrupta de alguns milhares de Kelvin para temperaturas na ordem de $10^6 K$ (MARISKA, 1992). Essa camada é geralmente observada com o auxílio de instrumentos sensíveis a região ultravioleta do espectro.

A coroa é a parte mais externa da atmosfera solar, estendendo-se por milhões de quilômetros a partir do Sol. Sua temperatura é extremamente elevada entre 1 e 2 milhões de Kelvin, sendo assim uma grande emissora de raios-X. De fato, ao observar o Sol na faixa dos raios-X (moles e duros), ou até mesmo em frequências de rádio, a fotosfera se torna invisível e pode-se observar a coroa (ASCHWANDEN, 2006). Além disso, o plasma dessa camada da atmosfera é expelido, formando o que conhecemos como vento solar. O vento solar nada mais é que um fluxo de partículas ionizadas, gerado pela enorme diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário.

1.4 Manchas solares e TSI

Como supracitado, o aparecimento de manchas solares (*sunspots*) é um fenômeno que ocorre na fotosfera. As manchas solares estão sempre localizadas dentro de regiões ativas, zonas interiores a arcos de campo magnético que se projetam desde a fotosfera até a coroa. As manchas solares são formadas pela interseção entre fortes

campos magnéticos tubulares e a superfície do Sol. Esses campos inibem a convecção de plasma, reduzindo localmente a temperatura. A formação dos *sunspots* relaciona-se com a formação das regiões ativas (SOLANKI, 2003). Devido à geometria solar, o plasma na região mais próxima ao equador tem velocidade maior que em outras regiões, fazendo assim com que as linhas de campo magnético que normalmente se encontram no interior do Sol emergam, formando pequenos poros individuais. Com o passar do tempo esses poros crescem e se aproximam, até unirem-se, formando as manchas solares (SOLANKI, 2003).

Os *sunspots* possuem normalmente duas regiões diferentes, a umbra e a penumbra, que estão em destaque na Figura 1.3. Observações mostram que devido à diferença de temperatura com relação ao restante da fotosfera, a umbra tem aproximadamente entre 20-30% do brilho do restante da camada e a penumbra entre 75-85% (SOLANKI, 2003).

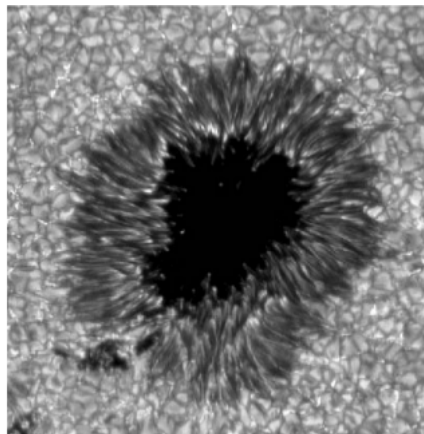


Figura 1.3 - Nessa imagem tem-se uma mancha solar. A parte escura central é a umbra e a parte estriada radial é a penumbra. As manchas menores em volta são células granulares de convecção. Fonte: Solanki (2003)

Uma das características mais importantes das manchas solares são sua periodicidade, o número de manchas no disco solar varia, tendo um período de aproximadamente 11 anos entre seus picos de intensidade (MILONE et al., 2003).

A Radiação Solar Total, ou mais comumente referida na literatura por Total Solar Irradiation (TSI), é a potência radiada pelo Sol medida em todos os comprimentos de onda que chega no topo da atmosfera terrestre (WILLSON, 1997). As medidas de alta precisão da TSI realizadas no espaço vem sendo feitas de forma ininterrupta

desde 1978 (KOPP et al., 2004). Esses dados quando cruzados com as medições do número de manchas no Sol, deixa evidente a correlação entre ambos.

O ciclo das manchas correlaciona-se com o nível de atividade solar. A Figura 1.4 mostra a evolução do número de manchas com o tempo, em preto, e da TSI, em diversas cores representativamente aos instrumentos utilizados. Os períodos em que se tem o maior número de manchas correspondem aos períodos em que a TSI (Total Solar Irradiance) está em seu máximo.

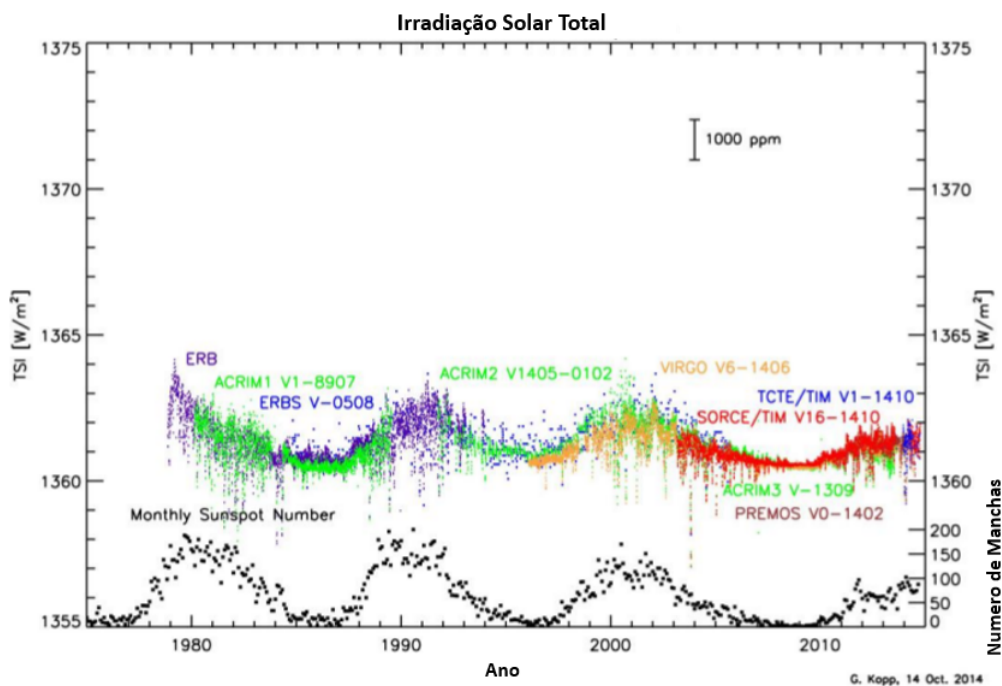


Figura 1.4 - Superposição dos dados provenientes de vários instrumentos. Esses dados se correlacionam com o número de manchas solares, deixando evidente o ciclo de atividade solar de 11 anos. Fonte: Kopp et al. (2012)

1.5 Balanço Anual de Energia Terrestre

A energia emitida pelo sol, a TSI, se propaga em forma de ondas que são chamadas de ondas curtas, devido sua frequência elevada. Quando essas ondas interagem com a atmosfera terrestre, parte delas é absorvida. A Figura 1.5 mostra os comprimentos de onda que são absorvidos em função da altitude. Outra parte é refletida e espalhada e o restante simplesmente prossegue em seu caminho rumo a superfície terrestre, onde novamente podem ser absorvidas ou refletidas. A energia total, proveniente das ondas

curtas, refletida para o espaço interplanetário é chamada de Albedo (COAKLEY, 2003).

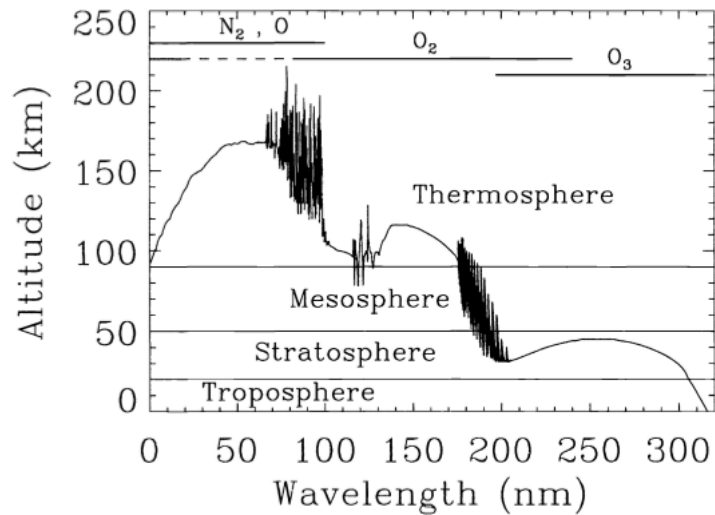


Figura 1.5 - Absorção da radiação solar na atmosfera terrestre. Fonte: Woods et al. (2000)

Outro tipo de energia, não proveniente do Sol, também entra no balanço. A superfície da Terra e sua atmosfera se comportam como corpos cinzas, em outras palavras irradiam energia térmica devido a sua temperatura (BERGMAN; INCROPERA, 2011). A irradiação proveniente da superfície terrestre e da atmosfera são chamadas de ondas longas. Parte da irradiação é emitida em direção à superfície terrestre e parte é emitida em direção ao espaço, podendo ser absorvida novamente pela atmosfera. A Figura 1.6 demonstra de forma esquemática o balanço de energia completo.

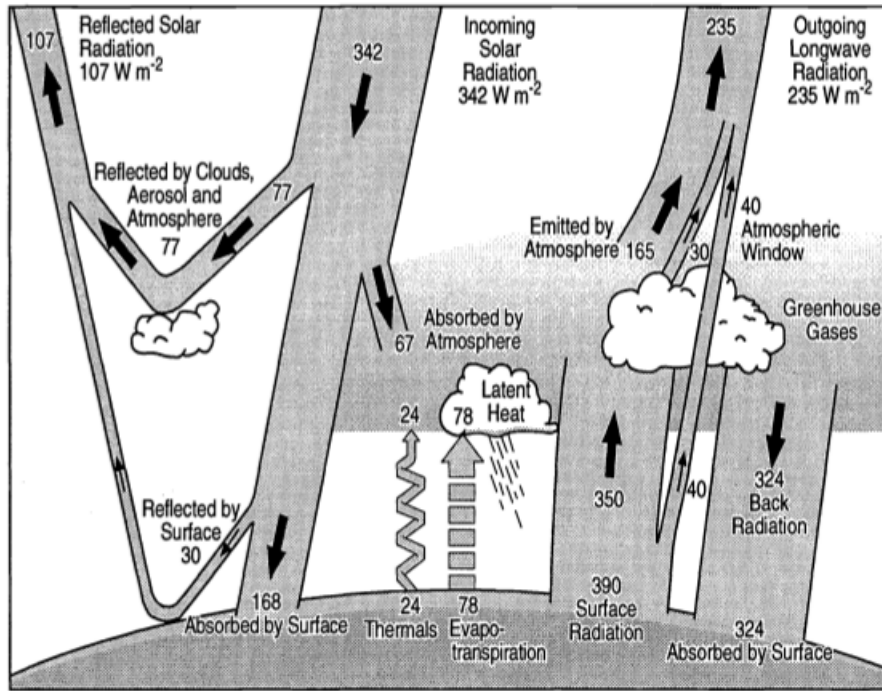


Figura 1.6 - Balanço de energia terrestre. Todas as unidades são dadas em $W m^{-2}$. Fonte: Woods et al. (2000)

Através das observações acima podemos determinar a equação que representa o balanço energético terrestre,

$$R_n = \hat{S}_d - S_{ref} + L_d - L_{surface} \quad (1.1)$$

onde \hat{S}_d é o fluxo de radiação solar incidente, S_{ref} é a parcela de radiação solar refletida, o albedo, L_d representa a porção descendente das ondas longas e $L_{surface}$ a parte ascendente das ondas longas, geradas pela superfície terrestre (SANTOS et al., 2011).

Para fins do presente trabalho, pode-se desenvolver a Equação 1.1. Considerando que S_{ref} é composta da parcela de radiação refletida pela superfície, S_{rs} , e pela parcela refletida pela atmosfera, S_{ratm} , temos:

$$R_n = \hat{S}_d - (S_{rs} + S_{ratm}) + L_d - L_{surface} \quad (1.2)$$

A radiação solar que chega ao topo da atmosfera terrestre, tem potência aproximada

de $1367Wm^{-2}$, e de forma distribuída pelo globo em torno de $342Wm^{-2}$ (WOODS et al., 2000). A potência das ondas longas pode ser encontrada na Tabela 1.1. Várias fontes também se dedicaram a pesquisar os fluxos totais dos dois tipos de radiação. Tais dados podem ser encontrados na Tabela 1.2.

Tabela 1.1 - O TPA é fluxo de ondas longas no topo da atmosfera e o SPF é o fluxo na superfície. F_d é o fluxo descendente e F_a o fluxo ascendente. Adaptado de Kiehl and Trenberth (1997)

Condições do céu Wm^{-2}	Limpo			Nublado		
	F_d	F_a	Diferença	F_d	F_a	Diferença
TPA	0	265	265	0	235	235
SPF	278	390	112	324	390	66

Tabela 1.2 - Estimativas do balanço de energia terrestre para diversas fontes, com albedos próximos as 30 %. Aqui OC e OL SÃO a diferença da radiação das ondas, longas e curtas respectivamente, com direção ascendente e descendente na superfície. SH é o calor específico da superfície e LH é o calor latente da superfície. Albedo é o albedo planetário em porcentagem. Fontes: a = National Academy of Sciences (1975), b = Budyko (1982), c = Paltridge and Platt (1976), d = Hartmann (1994), e = Ramanathan (1987), f = Schneider (1987), g = Liou (1992), h = Peixoto and Oort (1992), i = MacCracken (1985), j = Henderson-Sellers and Robinson (1986), k = Present study, l = Rossow and Zhang (1995), m = Ohmura and Gilgen (1993). Adaptado de Kiehl and Trenberth (1997)

Fonte	Superfície				Atm.	SPF
	OC	OL	SH	LH	Satm	Albedo
<i>NAS(75)^a</i>	174	72	24	79	65	30
<i>Budyko^b</i>	157	52	17	88	81	30
<i>PandP^c</i>	174	68	27	79	65	30
<i>Hartmann^d</i>	171	72	17	82	68	30
<i>Ramanath^e</i>	169	63	16	90	68	31
<i>Scheineder^f</i>	154	55	17	82	86	30
<i>Liou^g</i>	151	51	21	79	89	30
<i>PandO^h</i>	171	68	21	82	68	30
<i>MacCⁱ</i>	157	51	24	82	79	31
<i>H – SandR^j</i>	171	68	24	79	68	30
<i>KandT^k</i>	168	66	24	78	67	31
<i>RandZ^l</i>	165	46			66	33
<i>OandG^m</i>	142	40				

Esses dados indicam a importância da radiação solar e dos gases que compõem a atmosfera para o clima terrestre. Como pode-se perceber, grande parte da radiação solar não chega à superfície terrestre e grande parte da radiação descendente do balanço seria perdida caso não houvesse o efeito estufa, mostrando assim o efeito conjunto desses dois importantes fenômenos climáticos.

1.6 Medições da TSI

Atualmente existem inúmeros instrumentos medindo a TSI (KOPP et al., 2004). Os instrumentos de maior precisão encontram-se no espaço interplanetário realizando medições da TSI direta. As medições de alguns desses instrumentos podem ser encontradas na Figura 1.4. Nesta seção será discutido o funcionamento de um desses instrumentos, o TSIM, Total Solar Irradiance Monitor. A escolha de se estudar o TSIM se dá pelo fato de que ele obedece o princípio de funcionamento dos instrumentos mais precisos da atualidade e o mesmo é bem documentado.

O TSIM funciona pelo princípio da substituição elétrica. Esse princípio diz que um elemento de um circuito pode ser substituído por outro elemento sem alterar as suas propriedades, desde que em todos os instantes o novo elemento tenha os mesmos valores de corrente e tensão (potência) que o anterior (SMITH; ALLEY, 1992). Para o TSIM, o Sol funciona como um aquecedor que eleva a temperatura de uma parte do sistema a uma temperatura final T . Ao substituir o Sol por um elemento resistivo que dissipa calor e que partindo das mesmas condições iniciais eleva a mesma parte do sistema a uma temperatura T , o princípio de substituição elétrica diz que a potência dissipada por esse elemento relaciona-se com a potência proveniente do Sol. Como é possível controlar a área aquecida, o fluxo de energia proveniente do Sol pode ser encontrado, ou seja, a TSI. Esse conceito se tornará mais claro adiante.

O TSIM, como mostrado na Figura 1.7 possui três radiômetros. Os três radiômetros podem operar independentemente ou realizar medições simultâneas, dois deles são designados a operar regularmente e o terceiro tem a finalidade de medir a degradação nos dois primeiros. Os três radiômetros são alinhados em inclinações diferentes, aumentando assim o campo de visão do instrumento (FANG et al., 2014).

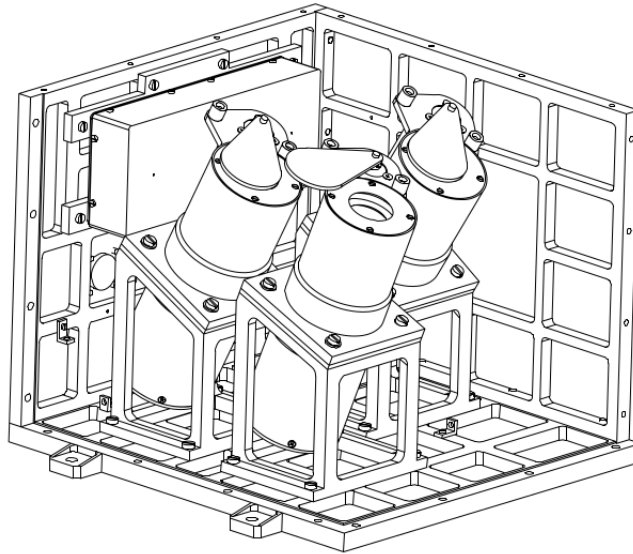


Figura 1.7 - Os três radiômetros dentro da estrutura do instrumento. Fonte: Fang et al. (2014)

Cada radiômetro possui duas cavidades cônicas. A superior é a cavidade primária e a inferior é a cavidade de referência para efeitos de compensação. Ambas as cavidades encontram-se em um cilindro de alumínio, que serve para dissipar o calor do sistema. Dentro do cilindro existem diversas aberturas projetadas para diminuir a radiação dispersa, proveniente de possíveis reflexões da parede do cilindro. Imediatamente antes da cavidade primária existe uma abertura de precisão, de área muito bem conhecida. Erros na medição da área dessa abertura, tem impacto direto na precisão do instrumento. Por fim, existe um obturador que pode ser aberto ou fechado dependendo do estágio de operação do instrumento. O esquema de um radiômetro pode ser encontrado na Figura 1.8.

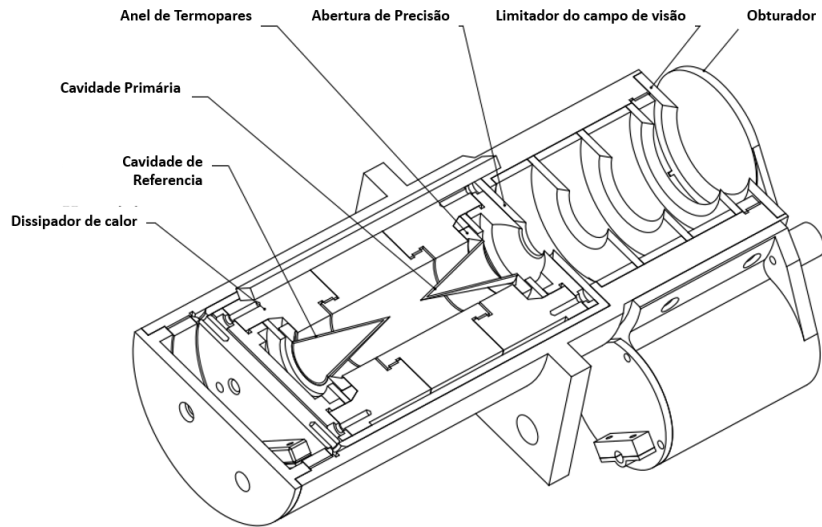


Figura 1.8 - Desenho esquemático do radiômetro. Fonte: Fang et al. (2014)

A cavidade primária é feita de alumínio, tem espessura de 0,06mm e seu interior é coberto por uma tinta preta que possui um coeficiente de absorção de 0.9997 para o espectro de medição do aparelho (FANG et al., 2014). Fios para aquecimento são embutidos na cavidade primária e existe um anel com termopares em contato com mesma. A junção fria dos termopares então em contato com o cilindro de alumínio. A cavidade secundária não pode ser exposta e também possui um anel com termopares que são ligados em série com os termopares da cavidade primária. Essa conexão é usada para compensar variações nas medidas causadas pelo aquecimento no revestimento de alumínio.

Quanto à eletrônica do instrumento, pode-se ter uma ideia geral a partir do diagrama de blocos na Figura 1.9.

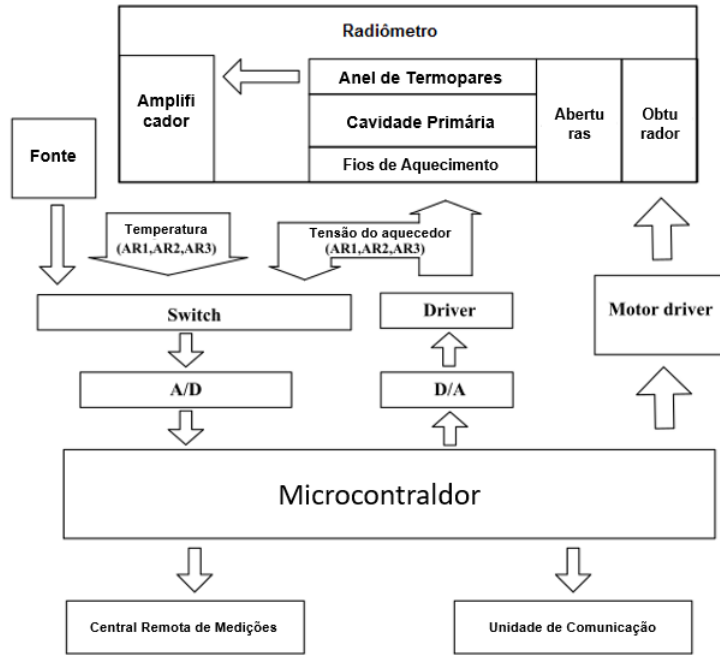


Figura 1.9 - Diagrama de blocos do circuito do TSIM. Fonte: Fang et al. (2014)

Quando o instrumento não está em operação, é aplicada constantemente uma potência elétrica P_m nos fios de aquecimento, deixando a cavidade primária a uma temperatura T_c quase constante. Quando o radiômetro entra em operação, o obturador se abre permitindo a entrada de radiação solar e o instrumento aplica uma potência P_{soe} na cavidade primária durante 6 minutos, durante esse período a cavidade entra em equilíbrio térmico a uma temperatura T_{so} . Em seguida, o obturador é fechado e uma potência P_{sre} é aplicada à cavidade primária, fazendo-a se estabilizar novamente em T_{so} . Dessa forma, a radiação solar, ou a TSI, pode ser calculada a partir de

$$E = \frac{P_{sre} - P_{soe}}{A\alpha}, \quad (1.3)$$

onde E é a TSI, A é a área da abertura de precisão e α é o coeficiente de absorção da cavidade primária.

1.7 Eletrônica

1.7.1 Polarização de Transistores

Transistores são a base da eletrônica moderna, possuindo diversas aplicações em sistemas analógicos e digitais. Transistores são frequentemente empregados como amplificadores de sinais dc, extraindo potência da fonte de alimentação.

A estrutura básica de um TBJ (Transistor Bipolar de Junção) pode ser vista na Figura 1.10, onde C é o coletor, B a base e E o emissor. Na maioria dos transistores a tensão V_{BE} , a tensão entre a base e o emissor, é de $0,7V$.

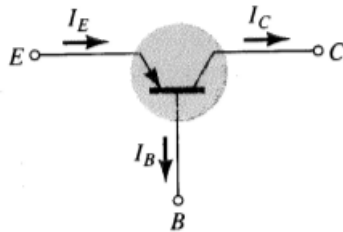


Figura 1.10 - Configuração básica de um TBJ. Adaptado de Boylestad et al. (2002)

Empregar transistores em circuitos de polarização é uma das formas mais simples de se projetar um amplificador de sinais. Polarizar um circuito transistorizado, significa que ao se aplicar um valor dc bem determinado ao circuito estabelecer-se-á valores fixos de tensão e corrente em todos os pontos do mesmo (BOYLESTAD et al., 2002).

Um bom exemplo de polarização de transistores é o circuito de polarização de emissor comum, representado na Figura 1.11.

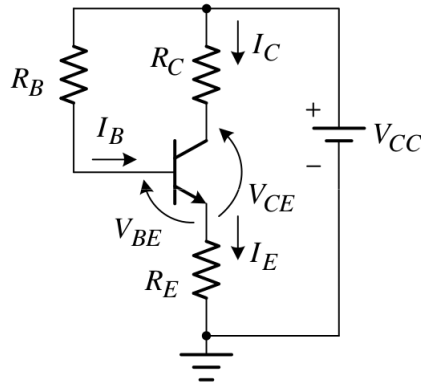


Figura 1.11 - Configuração de emissor comum para TBJ. Adaptado de Filadelfo (2016)

Para analisar esse circuito, deve-se saber algumas características comuns a praticamente todo circuito envolvendo transistores, como a relação entre as correntes I_B , I_C e I_E representadas nas Equações 1.4 e 1.5, onde h_{EF} é o fator de amplificação direta em emissor-comum,

$$I_C = h_{EF}I_B, \quad (1.4)$$

$$I_E = (1 + h_{EF})I_B. \quad (1.5)$$

Com 1.4 e 1.5, pode-se analisar o circuito por malhas e obter as Equações, 1.6 e 1.7, que descrevem o comportamento do sistema.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (h_{EF} + 1)R_E}, \quad (1.6)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C \quad (1.7)$$

1.7.2 Amplificadores Operacionais

Amplificadores operacionais, ou de forma abreviada amp ops, são circuitos muito versáteis, podendo compor desde circuitos amplificadores, filtros, reguladores de tensão até sistemas de controle. Esses circuitos integrados, Cis, possuem características

muito próximas às ideais, facilitando a construção de circuitos e garantindo fidelidade com relação ao projeto (SEDRA; SMITH, 1998).

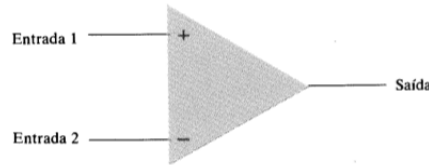


Figura 1.12 - Esquema reduzido de um amplificador operacional. Adaptado de Boylestad et al. (2002)

Os amp ops são alimentados por fontes cc e frequentemente simétricas. Do ponto de vista de sinal, a configuração do amp op é mostrada pela Figura 1.12. Em um amp op ideal, a impedância de entrada é infinita e a impedância de saída é nula. O sinal de saída é um número A multiplicado pela diferença dos sinais de entrada $A(V_2 - V_1)$. Outra característica importante dos amp ops se relaciona com a fase do sinal de saída. Em termos gerais a saída não possui defasagem com relação ao sinal da entrada 1. Porém, possui uma defasagem de 180° com relação à entrada 2. Por conta disso a entrada 1 é chamada de não inversora e a entrada 2 de inversora.

Um arranjo muito simples de amplificador não inversor para um amp op é encontrado na Figura 1.13.

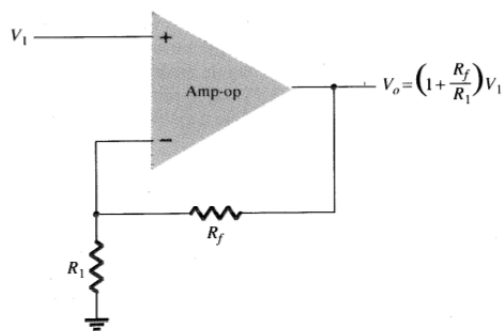


Figura 1.13 - Amplificador operacional em configuração não inversora. Adaptado de Boylestad et al. (2002)

Com esse arranjo, o ganho G do sistema é dado por:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}. \quad (1.8)$$

1.8 Controle

1.8.1 Sistemas com Feedback

Controladores tem como objetivo controlar uma ou mais variáveis em um sistema dinâmico. Por sistema dinâmico entende-se um sistema que varia seu comportamento com o tempo, frequentemente como uma resposta à perturbações externas (ASTRÖM; MURRAY, 2010).

Quando dois ou mais sistemas influenciam mutuamente seus comportamentos, tem-se um sistema com feedback. Pode-se observar um sistema com feedback pela Figura 1.14.

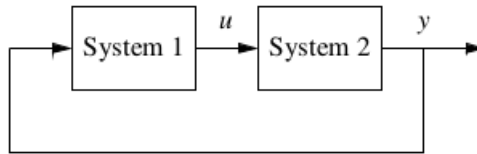


Figura 1.14 - Sistema com loop fechado. O controlador e o sistema formam um sistema com feedback Fonte: Aström and Murray (2010)

Controladores e outros sistemas, frequentemente formam sistemas de feedback. Se na Figura 1.14 o sistema 1 for um controlador e o sistema 2 o controlado, tem-se um exemplo de controle com feedback.

1.8.1.1 Controladores PID

Controladores PID (Proporcional Integral e Diferencial) representam 97% dos controladores nas indústrias químicas, refinarias e de papel nos Estados Unidos (DESBOROUGH; MILLER, 2002). Esse algoritmo de controle é largamente utilizado devido sua praticidade e confiabilidade.

O PID forma com o sistema controlado, um sistema de feedback, e dessa forma a resposta do algoritmo depende do sistema controlado. Em sua forma ideal a saída de um controlador PID é representado pela Equação 1.9

$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} = k_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right), \quad (1.9)$$

onde $u(t)$ é o sinal de controle, k_p , k_i e k_d são o ganho proporcional, integral e derivativo respectivamente e e representa o erro na saída. T_i e T_d são as constantes de tempo integral e derivativa. O controlador ideal pode ser encontrado na Figura 1.15.

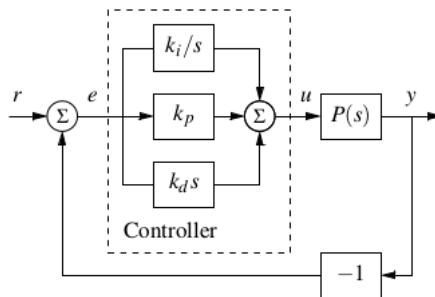


Figura 1.15 - Diagrama de blocos de um controlador PID simples. Adaptado de [Aström and Murray \(2010\)](#)

Nessa figura percebe-se que o controlador possui somente uma entrada, o erro com relação a r . Nesse sistema o r funciona como o *setpoint*, ou seja, o valor que deseja-se ter em y . Assim, $e = r - y$. A saída u do controlador tem como finalidade perturbar o sistema P para que sua saída y se aproxime de r .

Nos controladores PID o termo proporcional simplesmente multiplica o erro por K_p , essa parcela da equação isoladamente não garante a convergência entre y e r . O termo integral é responsável por realizar uma integração da curva do erro, quanto mais persistente for erro mais importante essa parcela se torna com o passar do tempo. Um ajuste adequado da componente integral é essencial para evitar demoras na resposta do algoritmo ou respostas exageradas. Por fim, a parcela derivativa encontra a derivada do erro, podendo assim indicar as tendências de aumento ou redução do erro.

De forma simples, o algoritmo PID tem sua saída baseada nos erros passados (fator integral), no erro presente (fator proporcional) e em uma predição do valor futuro (fator derivativo). Visualmente isso pode ser percebido com o auxílio da Figura 1.16.

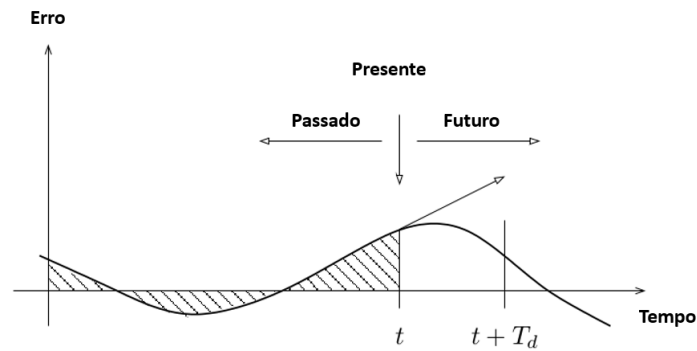


Figura 1.16 - Gráfico representando como um controlador PID atua sobre o erro. Adaptado de Aström and Murray (2010)

O bom ajuste dos ganhos é essencial nesse tipo de controlador, pois os parâmetros influenciam no tempo de resposta e estabilidade do sistema. A Figura 1.17 mostra o comportamento de um sistema com PID e a diferença da sua resposta com diferentes ajustes.

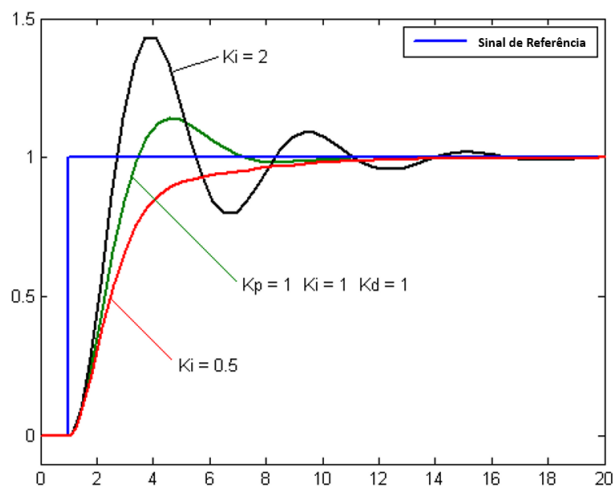


Figura 1.17 - Comportamento de um controlador PID com o *setpoint* em azul e com diferentes ajustes em k_i , k_p e k_d foram mantidos constantes. Adaptado de Wikipedia ()

Definir os ganhos de um controlador PID é o principal problema ao implementá-lo. A forma mais precisa de se otimizar esses parâmetros é descobrindo a função de transferência do sistema. Em outras palavras, descobrir como as propriedades

do sistema variam na presença de perturbações específicas. Porém, para a grande maioria dos sistemas, a dedução de sua função de transferência é um processo árduo e custoso, por isso foram desenvolvidas técnicas de calibração menos específicas, como os métodos Ziegler-Nichols e o Cohen-Coon (NORIS, 2006).

1.8.1.2 Método Cohen-Coon

Para boa parte dos sistemas, a calibração pelo método Cohen-Coon (C-C) apresenta melhor precisão e tempo de resposta que o método Ziegler-Nichols (NORIS, 2006). O método C-C vem da ideia de extrair as constantes k_i , k_p e k_d a partir de informações obtidas através da realização de alguns experimentos com o sistema.

Como mostrado no gráfico da Figura 1.18 o experimento consiste em analisar como o sistema responde a uma variação na saída CO do controlador. Para tanto define-se uma tensão inicial e se espera a variável de interesse PV no sistema se estabilizar. Após essa etapa, incrementa-se CO em um pequeno valor e se espera o sistema estabilizar novamente. Com o gráfico do comportamento de PV pode-se achar os parâmetros do PID.

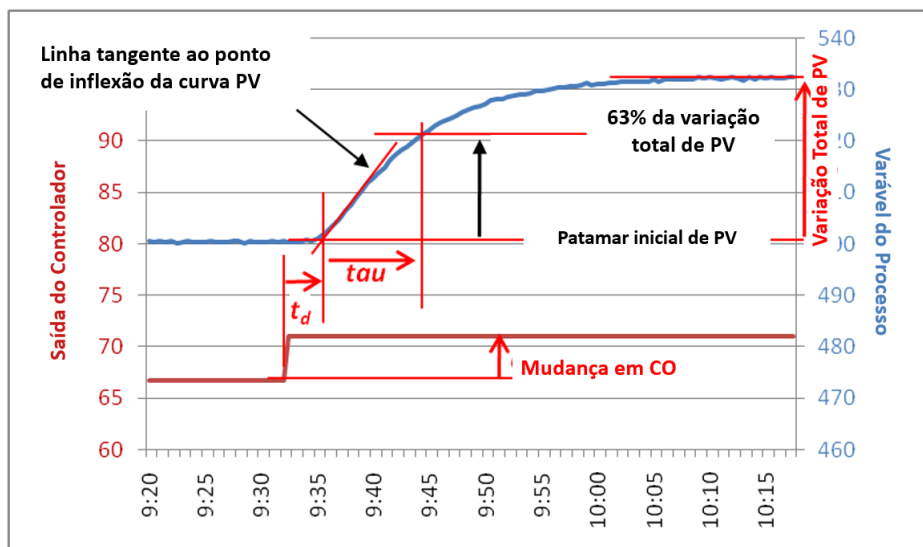


Figura 1.18 - Método gráfico para a obtenção dos parâmetros do PID. Adaptado de Aström and Murray (2010)

Para se obter os parâmetros, primeiro deve-se calcular o ganho G_p do processo. O ganho pode ser entendido como a variação de PV por unidade variada de CO e

pode ser calculado por:

$$G_p = \frac{\Delta PV}{\Delta CO}, \quad (1.10)$$

onde,

$$\Delta PV = \frac{\text{variação}_{PV}}{PV_{max} - PV_{min}}, \quad (1.11)$$

$$\Delta CO = \frac{\text{variação}_{CO}}{CO_{max} - CO_{min}}. \quad (1.12)$$

Sendo CO_{max} e PV_{max} os valores máximos que PV e CO podem alcançar e CO_{min} e PV_{min} os valores mínimos.

Outro valor essencial para se achar os parâmetros é o τ que pode se encontrado traçando uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva. Como mostrado no gráfico da Figura 1.18, τ é o intervalo entre a intersecção da reta tangente com o patamar inicial de PV e o instante em que PV atinge 63% do seu máximo.

Por fim deve-se calcular t_d , o *deadtime*. O t_d nada mais é que o intervalo de tempo entre o instante em que CO foi alterado e o momento em que PV começou a responder à essa variação. Sabendo esses valores os parâmetros do PID são dados por:

$$k_p = \frac{0.67}{G_p} \left(\frac{\tau}{t_d} + 0.185 \right), \quad (1.13)$$

$$T_i = 2.5 t_d \left(\frac{\tau + 0.185 t_d}{\tau + 0.611 t_d} \right), \quad (1.14)$$

$$T_D = 0.37 t_d \left(\frac{\tau}{\tau + 0.185 t_d} \right). \quad (1.15)$$

2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um radiômetro solar, para medir a irradiação solar local em solo, com a finalidade de investigar a influência da atividade solar na radiação e nas condições climáticas.

Os objetivos específicos são estudar os instrumentos descritos na literatura e a proposta científica do instrumento, elaborar a ideia conceitual do radiômetro, planejar o desenvolvimento do instrumento utilizando a plataforma Arduino, realizar testes de funcionamento, analisar a precisão do instrumento e estudar as melhorias que podem ser implementadas em trabalho futuro.

3 Materiais e Métodos

3.1 O Radiômetro

Para a construção do radiômetro foram usados como base radiômetros espaciais que funcionam pelo princípio da substituição elétrica. Dentre eles, o modelo de projeto tomado como referência foi o do TSIM (FANG et al., 2014). Porém, devido aos tipos de interferência encontradas em solo, algumas alterações de projeto foram feitas.

Quando se realiza medições em solo da radiação do Sol, um dos grandes fatores de interferência é a presença de nuvens. As nuvens como supracitado na Seção 1.5 podem refletir e absorver a radiação, reduzindo assim a energia que chega à superfície da Terra. Ao se realizar medições da mesma forma que o TSIM, que tem seu período de observação da radiação limitado a 6 minutos, a movimentação das nuvens na atmosfera pode gerar uma medida imprecisa e/ou inconsistente com a realidade. Por conta disso, nesse projeto tem-se duas câmaras operando simultaneamente durante as medições e ao contrário do TSIM, pelos recursos disponíveis, não foram usadas cavidades cônicas, mas duas pastilhas de alumínio que serão detalhadas adiante.

Dessa forma, para reduzir a imprecisão que medidas curtas geram, a câmara clara é exposta continuamente a radiação solar e a câmara escura é isolada da radiação do Sol. Durante o período de medição, o equipamento mantém a pastilha da cavidade escura na mesma temperatura da pastilha da cavidade clara, que é aquecida somente pela energia solar, e toma medidas referentes a temperatura e potência gasta.

Outro fator que difere o instrumento construído para operar em solo daqueles que operam no espaço é a forma de dissipação de calor. No TSIM, a principal fonte de dissipação térmica é a condução da calor através da estrutura de alumínio do equipamento. No radiômetro do presente trabalho, a dissipação térmica ocorre quase que inteiramente por convecção forçada com o auxílio de um ventilador interno.

No radiômetro desenvolvido aqui, pelas condições disponíveis, o aquecedor se trata de um resistor de potência, diferindo assim do TSIM ou do TIM (KOPP et al., 2004), que possuem o aquecedor embutido na cavidade escura. Apesar da escolha de um resistor de potência como aquecedor tornar a construção do *hardware* mais fácil, complica-se o tratamento de dados, visto que diferente do TIM, por exemplo, somente parte da potência dissipada pelo aquecedor é absorvida pela pastilha. Fazendo-se assim, necessárias calibrações adicionais no instrumento.

3.2 Medições Preliminares

Algumas medições preliminares foram feitas com o objetivo de guiar a construção do instrumento. Foram realizadas medições das pastilhas de alumínio utilizadas no projeto, seu comportamento térmico quando expostas ao Sol e o percentual de potência que a pastilha absorve do aquecedor. As pastilhas foram feitas a partir de um processo de usinagem e possuem uma camada de Ni-P preto com absorvidade α de aproximadamente 0.99999.

Tabela 3.1 - Características das pastilhas de alumínio, onde P_1 é a pastilha da câmara clara e P_2 a pastilha da câmara escura. *Valores médios

	Massa (g)	Diâmetro* (mm)
P_1	$7.6725 \pm 0.5 \times 10^{-4}$	$30.05 \pm 0.5 \times 10^{-2}$
P_2	$7.8511 \pm 0.5 \times 10^{-4}$	$30.05 \pm 0.5 \times 10^{-2}$

A massa das pastilhas foi medida com uma balança Shimadzu modelo AUX220 e as dimensões foram medidas diversas vezes com o auxílio de um paquímetro Mitutoyo e se encontram na Tabela 3.1.

Para avaliar o comportamento da temperatura da pastilha, quando exposta à luz do Sol, mediu-se a temperatura da pastilha de forma constante com o auxílio de um termistor. Essa medição pode ser encontrada na Figura 3.1 .

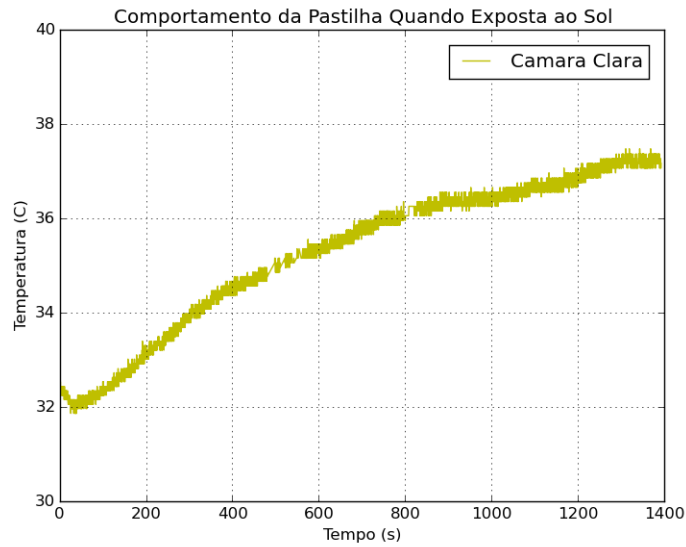


Figura 3.1 - Comportamento da pastilha de alumínio quando exposta à luz sol.

Para se obter o percentual de potência que a pastilha absorve do aquecedor, pode-se fazer uma aproximação. Com boa precisão, é possível aproximar o percentual de fluxo de energia que sai do aquecedor para a pastilha como a relação entre a área que a pastilha faz contato com o aquecedor e a área total do aquecedor (BERGMAN; INCROPERA, 2011). Nessa suposição considera-se que o resistor dissipa calor uniformemente por toda a sua superfície.

Sucessivas medições foram realizadas e os valores para as áreas foram calculados e estão na Tabela 3.2. Com esses valores foi possível calcular o percentual de potência absorvida $\sigma = 0.153 \pm 9.96 \times 10^{-3}$.

Tabela 3.2 - Valores medidos de área.

	Medições (m^2)
Área de Contato	$0.0003 \pm 1.5 \times 10^{-5}$
Área do Resistor	$0.00197 \pm 8.21 \times 10^{-5}$

3.3 Modo de Operação

Ao entrar em operação, o instrumento inicia o estágio de pré-medição. Essa etapa consiste em elevar a temperatura da pastilha para 40°C e dura 10 minutos. O valor

de 40°C foi escolhido pois os valores da temperatura da pastilha exposta ao Sol se aproximaram desse valor nas medições representadas na Figura 3.1. Essa etapa é importante pois reduz o período transiente do controle PID, visto que reduz o erro inicial com relação a câmara clara.

Após os 10 minutos da primeira etapa, o instrumento entra no segundo estágio, o modo de medição. O algoritmo de controle começa a comparar a temperatura nas duas pastilhas e tenta igualá-las. A corrente que circula pelo elemento resistivo que serve como aquecedor é medida, bem como a tensão aplicada sobre o aquecedor, dessa forma sendo possível medir a potência fornecida para o mesmo. Durante todo o processo, o instrumento envia as informações de potência fornecida para o aquecedor e a temperatura nas câmaras clara e escura via rádio para um computador que processa e armazena os dados através de um algoritmo em Python.

Após o início do segundo estágio, a medição, o processamento e o armazenamento de dados ocorre de forma contínua. A interrupção das medidas pode ser realizada via software ou pela interrupção da alimentação do instrumento.

3.4 Aquisição de Dados

Como mencionado no tópico anterior, os dados coletados pelo instrumento são enviados através de um módulo de rádio. Esse módulo opera na frequência de 433MHz e realiza transferências a uma taxa de 4Kb/s. As informações transmitidas são recebidas por outro módulo de rádio conectado ao computador.

Foi desenvolvido um algoritmo em Python, para ler, armazenar e plotar os dados coletados em forma de gráficos. A linguagem de programação Python foi escolhida para essa tarefa por ser uma linguagem de fácil uso, *open – source* e além de tudo interpretada. Em outras palavras, códigos escritos em Python não são compilados para uma determinada arquitetura de computador ou para um determinado sistema operacional, seu código é interpretado por uma máquina virtual, facilitando assim a portabilidade do código.

3.5 Fonte de Alimentação

Para que o equipamento fosse independente de fontes externas de alimentação, foi desenvolvida uma fonte de alimentação interna. Como pode ser visto pela Figura 3.2 a tensão da rede local é convertida para 18V_{AC} através do transformador TR_1 de 500mA. O circuito de retificação é formado pelos diodos D_1 , D_2 , D_3 , D_4 em configuração de ponte retificadora de onda completa. Todos diodos são 1N4007. A

escolha do 1N4007 se deu pelo fato de serem diodos baratos e comuns nesse tipo de aplicação.

Da saída da ponte, tem-se uma filtragem inicial realizada pelo capacitor C_1 , que possui um valor relativamente alto, $1000\mu F$, para produzir um baixo fator Ripple e diminuir o estresse no regulador. Dessa forma, tem-se uma tensão retificada de 18V aplicada a entrada do regulador LM7815. Esse regulador é empregado para se converter a tensão na sua entrada para 15V, ele também fornece um ajuste fino na tensão fornecida ao circuito, reduzindo assim as variações na alimentação do mesmo. O capacitor C_2 na saída do LM7815 funciona como um filtro fino e possui $100nF$.

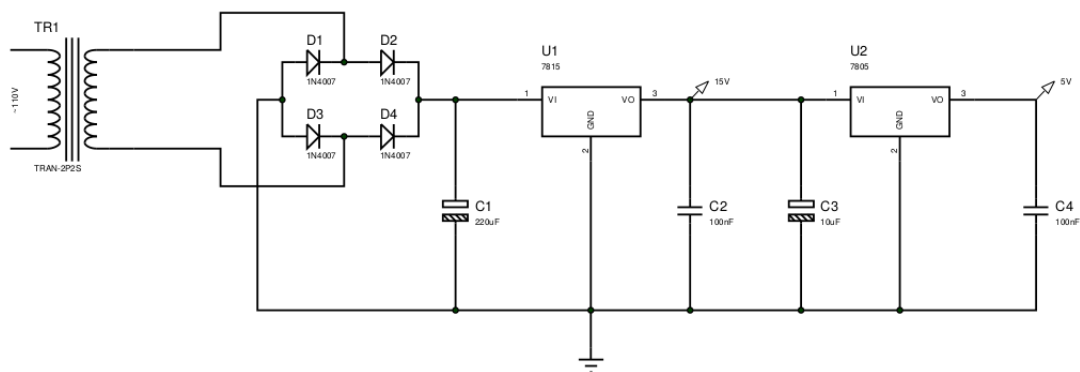


Figura 3.2 - Fonte de tensão do instrumento.

Na entrada do LM7805, tem-se C_3 de $10\mu F$ que funciona como filtro primário para o segundo regulador. O LM7805 foi empregado para fornecer uma tensão estável de 5V para o circuito, podendo assim alimentar o microcontrolador ATmega328P, o DAC MCP4725 e o sensor de corrente ACS7121. E por fim, C_4 de $100nF$, funciona como um filtro final para reduzir quaisquer transientes remanescentes dos ruídos do circuito.

Nessa etapa do projeto, a filtragem foi uma preocupação constante, visto que ruídos diminuem a estabilidade da potência fornecida para o sistema de aquecimento do radiômetro, gerando assim imprecisão.

3.6 Controle do Sistema

A Figura 3.3 mostra o circuito de controle do sistema. O Atmega328P é um microcontrolador robusto usado na plataforma de prototipação Arduino, que possui IDE

própria e uma comunidade ativa na solução de problemas e criação de projetos.

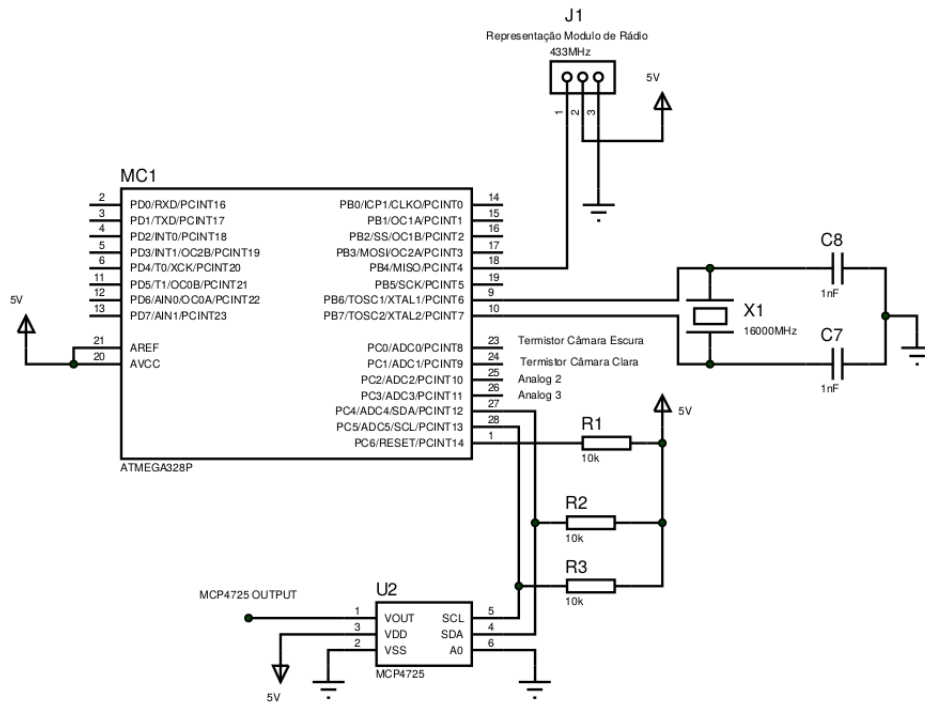


Figura 3.3 - Circuito de controle desenvolvido em torno do ATmega328p.

O MCP4725 é um conversor digital/analogico de 12-bits. O uso de um conversor se faz necessário pois o ATmega328P só possui saídas digitais, o que necessariamente implicaria em um controle do aquecedor por Modulação de Largura de Pulso, PWM, impossibilitando a aquisição de potências instantâneas. O MCP4725 opera dentro da faixa de tensão fornecida pelo ATmega328P e, pelo fato de ser um dispositivo que opera com o protocolo de comunicação I^2C , facilitando a implementação do software.

O componente J_1 representa o módulo de rádio utilizado no projeto. Ao se usar um sistema de comunicação sem fio torna-se possível o uso remoto do instrumento com baixo custo, pois retira a necessidade de vários computadores para o processamento de dados ou o uso de grandes cabos para a comunicação, caso forem usados diversos radiômetros em localizações diferentes para as medições. J_1 opera em 433MHz, uma frequência aberta e utilizada por diversos dispositivos.

Os resistores R_1 , R_2 e R_3 funcionam como resistores de *pull-up*, em especial R_2 e

R_3 são necessários para o funcionamento do MCP4725 devido a comunicação I^2C . E por fim o cristal X_1 funciona como oscilador para o ATmega328P, gerando o seu *clock*, sinal responsável pela sincronização de eventos no microcontrolador.

3.7 Driver de Potência

O driver de potência da Figura 3.4 basicamente amplifica o sinal proveniente do MCP4725, que tem como limitação de saída 5V e 25mA. Amplificar esse sinal é necessário para se conseguir uma potência adequada no aquecedor, que na Figura 3.4 é representado por R_5 .

A amplificação do sinal se dá em dois estágios. O primeiro, passando pelo amp op TCA0372, amplifica o sinal gerado pelo conversor analógico digital (DAC), transformando a faixa de sinal de 0-5V para 0-15V, ou seja, o ganho nessa etapa é equivalente a 3. O estágio de amplificação inicial foi feito dessa forma para aproveitar a tensão máxima fornecida pela fonte de alimentação.

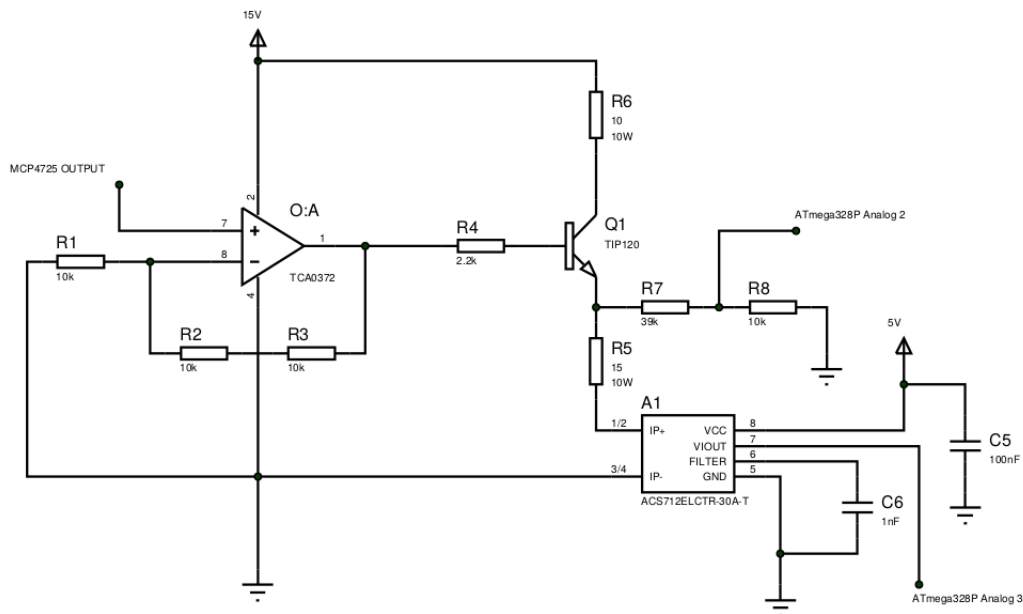


Figura 3.4 - Driver de potência. A construção do driver foi necessária devido às limitações do microcontrolador.

O ganho G de um amplificador operacional em configuração não inversora é dado por:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R}{R_1}, \quad (3.1)$$

onde V_i é o sinal de entrada do primeiro estágio e V_o o sinal de saída. Sabendo que $G = 3$ e fixando $R_1 = 10K\Omega$, R deve ser igual a $20k\Omega$. Por conveniência pode-se fazer $R = R_2 + R_3$ sendo $R_2 = R_3 = 10k\Omega$.

A segunda etapa de amplificação consiste primariamente em aumentar a corrente do sinal. Para tanto, usou-se um transistor BD137, Q_1 em configuração de emissor comum. Para o projeto, definiu-se de forma arbitrária i_C , a corrente no coletor, como $500mA$ e R_5 com 15Ω , com a finalidade de se obter uma potência dissipada da ordem $4W$ em R_5 . Da documentação do BD137 sabe-se que para uma corrente de $500mA$ e $V_{CE} = 2V$, $h_{FE} = 25$, assim pode-se calcular i_B , a corrente na base do transistor:

$$i_B = \frac{i_C}{h_{FE}} = \frac{0,5}{25} = 0,02A. \quad (3.2)$$

Com o i_B foi possível encontrar R_4 , através de:

$$R_4 = \frac{V - V_{BE} - (h_{FE} + 1)R_5i_B}{i_B} = \frac{15 - 0,7 - 26 \times 15 \times 0,02}{0,5} = 235\Omega. \quad (3.3)$$

E R_6 pode ser obtido por:

$$R_6 = \frac{V - V_{CE}}{i_C} - R_E = \frac{15 - 2}{0,5} - 15 = 11\Omega \quad (3.4)$$

Por não existirem valores comerciais iguais aos dos resistores R_4 e R_6 , aproximou-se ambos respectivamente a 330Ω e 10Ω .

O ACS712, representado por A_1 , emite pela sua porta 7 um nível de tensão proporcional à corrente i_E . E juntamente com as leituras do divisor de tensão formado por R_7 e R_8 pode-se calcular a potência fornecida a R_5 .

3.8 Estrutura e Placa de Circuitos

Os circuitos apresentados nas Seções 3.5, 3.6, 3.7 foram montados em uma placa perfurada padrão de fibra de fenolite com dimensões 20×10 centímetros como pode-se

ver na Figura 3.5. Essa placa facilita o processo de montagem do circuito, contornando a necessidade de se construir uma placa de circuito impresso.

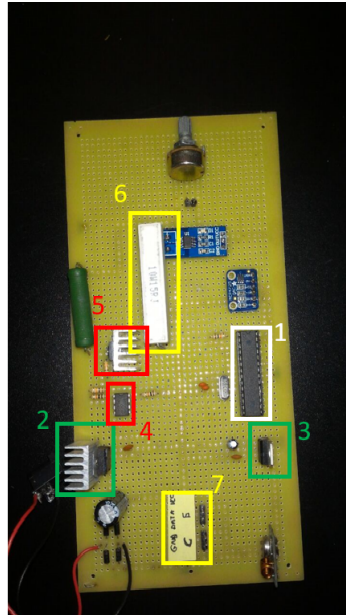


Figura 3.5 - Circuitos montados em um placa perfurada de fenolite.

Na Figura 3.5 pode-se ver o ATmega328P indicado pelo número 1, o LM7815 e o LM7805 indicados respectivamente pelos números 2 e 3, o TCA0372 e o BD137 indicados respectivamente por 4 e 5, o resistor/aquecedor é indicado por 6 e as entradas para os termistores é indicada por 7.

Em 1 e 5, foram fixados dissipadores de calor, pois a temperatura desses componentes pode atingir valores relativamente altos, logo o uso de dissipadores é essencial para garantir a integridade dos componentes aumentando o fluxo do calor que é dissipado. É importante ressaltar que a interface entre os componentes e os dissipadores foi preenchida com pasta térmica para melhorar as propriedades de condução da interface.

A distribuição dos componentes ocorreu de forma relativamente espaçada, devido à grande taxa de aquecimento dos componentes. Essa precaução foi tomada para evitar a falha ou até mesmo a inutilização dos componentes caso a temperatura de operação dos mesmos seja ultrapassada.

A estrutura projetada para o instrumento pode ser vista na Figura 3.6. A caixa

possui dimensões 24x13.5x4 centímetros e foi fabricada em MDF. O corte das partes foi realizado por corte à laser.

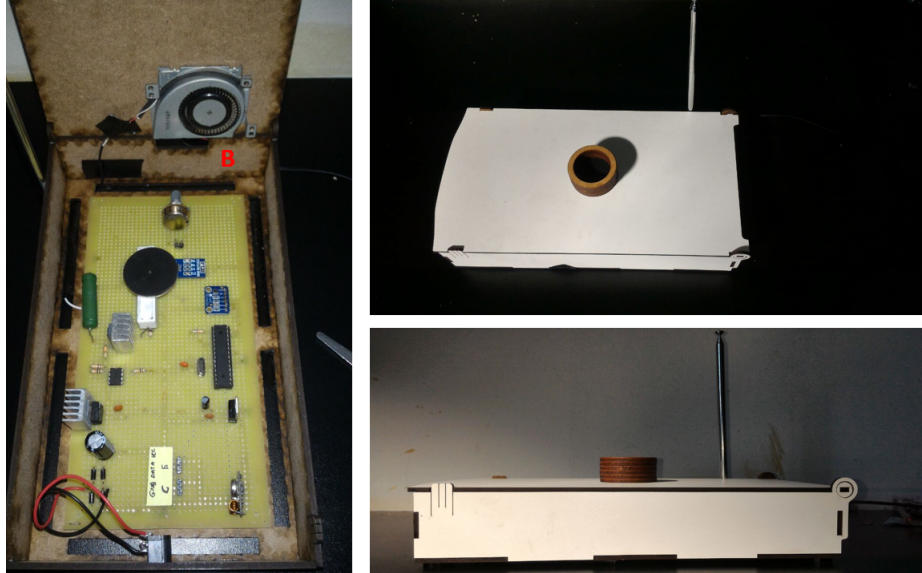


Figura 3.6 - Fotos da estrutura do radiômetro.

Como pode ser visto na Figura 3.6, a caixa possui seis furos em sua parte inferior e outro em sua face *B*, possibilitando assim a dissipação de calor por convecção forçada gerada pelo ventilador presente na estrutura. Na face exterior da tampa, pode-se observar o compartimento que é chamado de câmara clara e na face interior um furo com diâmetro de 5 milímetros que possibilita o acesso do termopar à pastilha do compartimento claro. A câmara escura compreende a toda parte interna da estrutura.

O conjunto do instrumento completo pode ser visto na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Radiômetro completamente montado com todos os termistores.

3.9 Calibração

Dois métodos de calibração diferentes foram aplicados, a primeira calibração foi realizada de forma manual, definindo os parâmetros arbitrariamente, com a finalidade de testar o algoritmo PID implementado e o funcionamento do circuito. Os parâmetros estabelecidos podem ser encontrados na Tabela 3.3.

A segunda calibração do instrumento foi realizada com o método Cohen-Coon. Para tanto, foram estabelecidos dois patamares de tensão arbitrários, o patamar inicial de $1.95V$ e o final de $2.44V$. O primeiro nível de tensão foi aplicado durante 1203,73 segundos e, imediatamente após, aplicou-se o segundo patamar até que a temperatura na pastilha se estabilizasse. O gráfico da temperatura pode ser visto na Figura 3.8.

Tabela 3.3 - Parâmetros estabelecidos arbitrariamente.

	Parâmetros		
	k_p	k_i	k_d
Valor	80	7	9

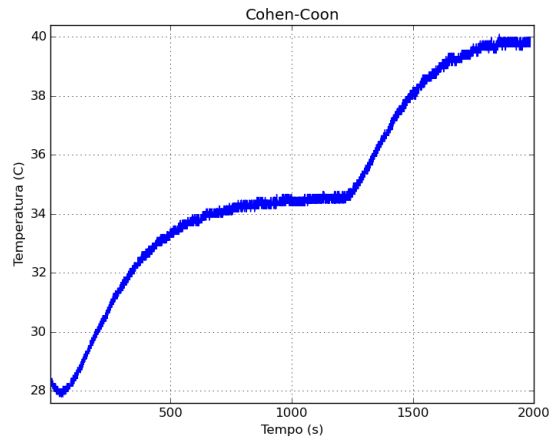


Figura 3.8 - Gráfico utilizado na calibração do instrumento. Primeiro patamar a 1.95V e segundo patamar a 2.44V.

Conforme o método Cohen-Coon os parâmetros do PID foram encontrados e podem ser vistos na Tabela 3.4

Tabela 3.4 - Dados para utilização do método Cohen-Coon e parâmetros obtidos.

Dados		Parâmetros PID	
t_d	7.192	k_p	12.89
G	3.584	T_i	17.76
τ	244.769	T_d	2.65

3.10 Medições e Análise dos Dados

As medições foram realizadas por volta do meio dia, de 12 às 13h, tendo duração mínima de 20 minutos. Esse período foi escolhido pois é o período onde o Sol está mais próximo ao Zênite. Além disso, as medições foram realizadas em Lorena no Estado de São Paulo, localizada na latitude 22°43'51" sul e a uma longitude 45°07'29" oeste.

Durante as medições foram coletados os dados da temperatura na câmara clara, na câmara escura e a potência dissipada no aquecedor. Como a potência dissipada pelo aquecedor não é totalmente absorvida pela pastilha, a Equação 1.3 não pode ser aplicada diretamente para se calcular a irradiação local. Então, deve-se aplicar o percentual de potência absorvida σ obtido na Seção 3.2. Dessa forma, sabendo que

$P_{soe} = 0$ a Equação 1.3 fica:

$$E = \frac{\sigma P_{sre}}{A\alpha}. \quad (3.5)$$

4 Resultados e Discussão

4.1 Aquecimento dos Componentes

Um dos principais fatores para garantir a durabilidade e a estabilidade do instrumento é a temperatura em certos componentes críticos. No presente projeto existem dois componentes sujeitos a correntes relativamente altas, o regulador de tensão LM7815 e o transistor BD137. Dessa forma, saber o comportamento da temperatura nesses componentes durante a operação pode garantir o bom funcionamento do equipamento.

As temperaturas nos dois componentes críticos foram medidas enquanto o instrumento operava em potência máxima, ou seja, a saída do MCP4725 foi fixada em 5V. Os dados obtidos podem ser encontrados na Figura 4.1.

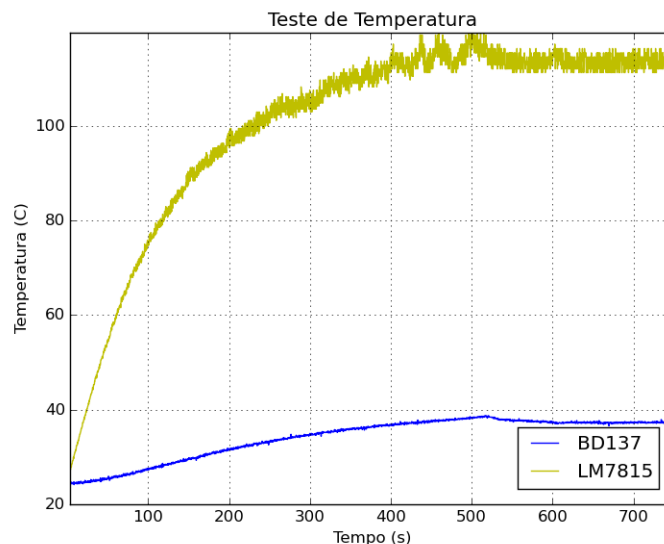


Figura 4.1 - Aquecimento dos componente LM7815 e BD137 quando o instrumento opera em potencia máxima.

Como pode ser visto na Figura 4.1, a temperatura máxima atingida pelo BD137, foi próxima dos 37°C. A temperatura máxima de operação desse componente é de 150°C. Portanto, está operando em um regime ideal, longe da sua temperatura de ruptura. Já o LM7815 apresentou uma temperatura em torno dos 114°C no ponto de estabilidade como pode ser visto na Figura 4.2. Esse valor é muito próximo da temperatura máxima de operação do componente, comprometendo assim a sua

durabilidade. Em situações mais extremas de clima, onde a temperatura ambiente seja alta, o componente pode vir à falha rapidamente. Uma solução alternativa aos reguladores lineares de tensão, como o LM7815, é o uso de conversores chaveados, como os conversores Buck e Boost (ANDRÉ et al., 2000). Tais conversores possuem um menor consumo de potência e menor aquecimento que os reguladores lineares.

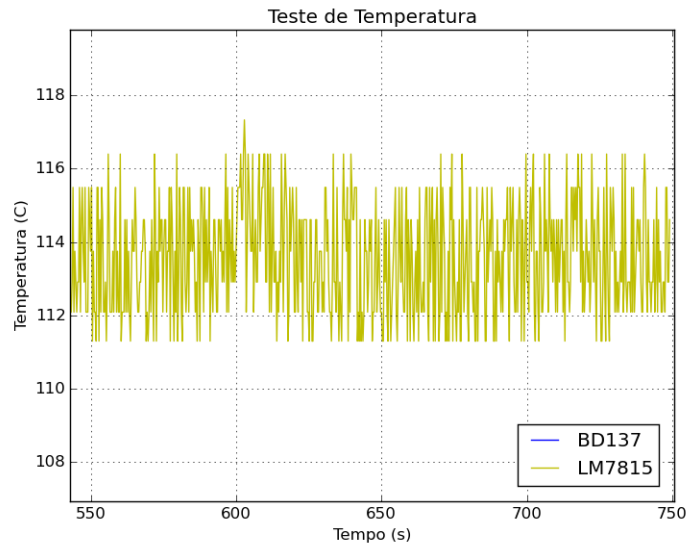


Figura 4.2 - Visualização detalhada da Figura 4.1 para o LM7815.

4.2 Calibrações

Para testar ambos os métodos de calibração, tanto o manual quanto pelo método Cohen-Coon, o algoritmo PID foi utilizado para tentar manter a temperatura da câmara escura em 50°C, denominado *Setpoint*. O resultado dos dois testes estão demonstrados nos gráficos das Figuras 4.3 e 4.4. Os valores dos parâmetros em ambos os testes estão na Tabela 4.1.

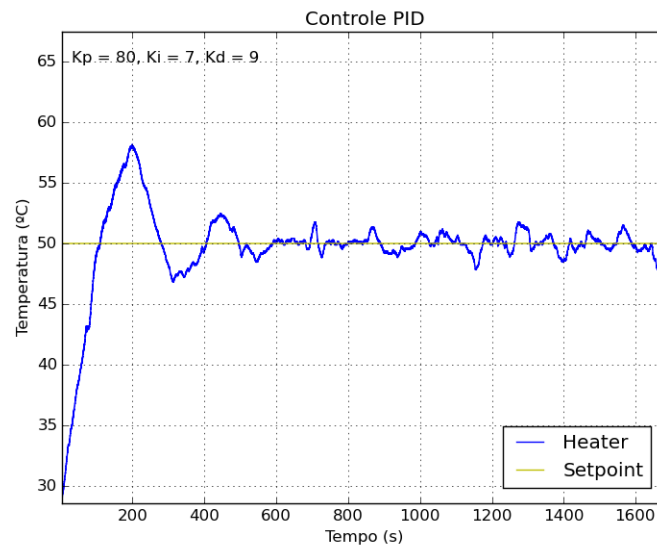


Figura 4.3 - Teste da calibração manual, com setpoint em amarelo.

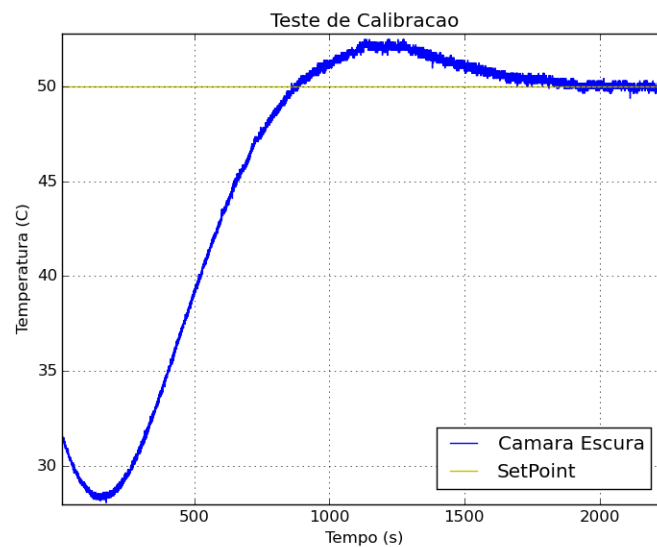


Figura 4.4 - Teste da calibração com o método Cohen-Coon, com setpoint em amarelo.

O resultado da calibração usando o método Cohen-Coon se mostrou mais eficiente. O sistema apresentou somente um pico inicial, saindo de forma relativamente rápida do regime transiente. Vale lembrar que a velocidade com a qual os ajustes feitos pelo PID afetam o sistema depende diretamente da condutividade térmica do material

Tabela 4.1 - Parâmetros PID para os dois testes realizados.

	Método	
	Manual	Cohen-Coon
k_p	80	12.89
k_i	7	0.726
k_d	9	34.116

utilizado na pastilha.

4.3 Medições de Radiação

Foram realizadas no total cinco medições de radiação solar. Os valores obtidos para a radiação são representados por E e podem ser vistos pela Tabela 4.2 juntamente com a razão entre as temperaturas das câmaras clara T_c e escura T_e .

Tabela 4.2 - Medições da radiação local. Todas as medições foram realizadas entre as 12-13h com duração mínima de 20 minutos. Na última coluna L quer dizer céu limpo, PN parcialmente nublado e N completamente nublado.

Data	Medições		Céu
	$E(W/m^2)$	Razão (T_e/T_c) (%)	
30/06/2017	133 ± 8.7	$99.74 \pm 1.82 \times 10^{-2}$	L
01/07/2017	3.2 ± 0.24	$99.86 \pm 2.68 \times 10^{-2}$	PN
08/07/2017	23 ± 1.56	$96.31 \pm 2.5 \times 10^{-2}$	N
09/07/2017	141 ± 9.22	$99.94 \pm 2 \times 10^{-2}$	L
10/07/2017	154 ± 10	$99.05 \pm 1.9 \times 10^{-2}$	L

Os primeiros dados que se destacam são os referentes às medições dos dias 01/07 e 08/07. O valor da radiação nesses dois dias está muito abaixo do esperado de acordo com os valores teóricos apresentados na Seção 1.5. No dia 08/07 como mostrado na tabela, o céu estava parcialmente nublado, fazendo com que a movimentação das nuvens alterasse bruscamente a quantidade de radiação que alcançava a câmara clara. O resultado disto pode ser visto no gráfico da Figura 4.5.

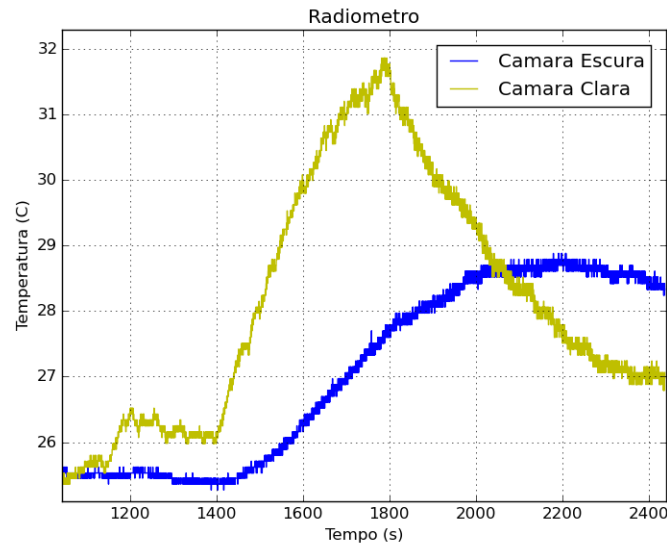


Figura 4.5 - Região das medições utilizada para o cálculo da radiação solar. Céu parcialmente nublado.

Como pode ser observado pelo gráfico da Figura 4.5, a temperatura entre as câmaras diferiu em até 4°C, o que torna essa medida pouco ou não representativa. Uma forma possível de se contornar essa imprecisão gerada por variações bruscas de temperatura na câmara clara é a utilização de um algoritmo PID autorregulador, utilizando lógica Fuzzy. Esse tipo de controlador acelera a convergência da variável do processo com relação ao *Setpoint* e atrasa a divergência (HE et al., 1993). Dessa forma, o controle de temperatura se torna mais preciso em grandes variações de *Setpoint*, tornando as medições mais precisas.

No dia 01/07, o céu estava completamente nublado, fazendo com que os níveis de radiação que alcançavam a câmara clara fossem muito baixos. Apesar dos valores de temperatura entre as câmaras nessas medidas estarem muito próximos, como pode ser visto pelo gráfico da Figura 4.6, esses dados não correspondem à realidade, visto que devido à precisão limitada na medição da temperatura, o instrumento estava reconhecendo a temperatura da câmara clara como idêntica a temperatura ambiente. É importante notar que o valor de potência aplicada nessa medição é proveniente de ruídos, e sem os mesmos, esse valor deveria ser zero.

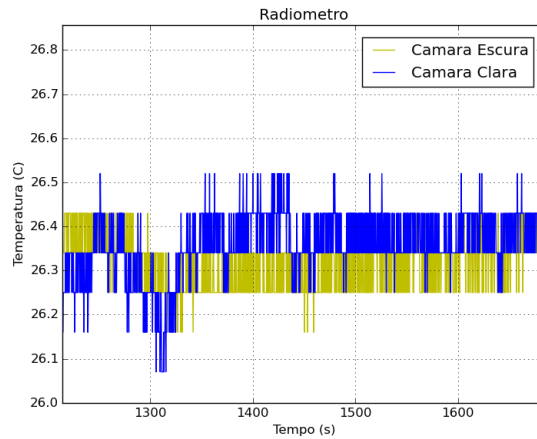


Figura 4.6 - Região das medições utilizada para o cálculo da radiação solar. Céu completamente nublado.

Analisando as medidas dos dias 30/06, 09/07 e 10/07 percebe-se que os valores medidos para a radiação aproximam-se do valor previsto pela teoria para a radiação solar direta, $192W/m^2$. Apesar de próximos, existe uma diferença entre as medições e o valor esperado. Esse desvio pode ter ocorrido por diversos fatores, entretanto, um dos fatores que mais se destaca é o alinhamento com o Sol. Devido à ausência de um aparato para alinhar o instrumento enquanto se realizavam as medidas, pode-se ter perdido campo de visão do Sol tanto por erro de alinhamento ao se posicionar o instrumento ou pelo próprio movimento Sol-Terra. Outro fator causador de erros é a diferença de massa entre as pastilhas das câmaras clara e escura, como é evidenciado pela Tabela 3.1, assim como a aproximação para o σ feita na Seção 3.2. Por fim, mas não menos importante, efeitos como a poluição local podem ter afetado as medições e necessitam investigação mais aprofundada.

5 CONCLUSÕES

As medições de radiação solar realizadas com o instrumento radiômetro no presente trabalho apresentaram uma aproximação adequada aos valores teóricos presentes na literatura. Esses valores, porém, só foram obtidos em situações ideais onde o céu estava perfeitamente limpo, demonstrando assim uma grande limitação dos método de câmara dupla com um algoritmo PID convencional. Esse método falha pois o tempo de resposta oferecido pelo algoritmo com os métodos de calibração pré-medição, geralmente não oferece um equilíbrio satisfatório entre o tempo de reposta à variações bruscas de *Setpoint* e velocidade e precisão na convergência.

Outro fator que se mostrou um importante gerador de imprecisões foi a ausência de um rastreador solar. Tal aparato proporcionaria uma incidência normal uniforme de radiação solar na pastilha da câmara clara durante toda a medição. A ausência de um seguidor solar acarreta na perda de energia nas paredes do tubo da câmara clara, diminuição de fator de vista entre o instrumento e o Sol, bem como o aumento de radiação difusa capturada pela câmara clara.

No presente projeto foi empregado um sistema de troca de calor por convecção forçada. Durante a construção do projeto optou-se por manter a potência do ventilador constante. Uma forma de melhoria desse sistema seria a implementação de um controle PID para o ventilador, fazendo-o ajudar no processo de convergência da variável de controle ao *Setpoint*, aumentando sua potência quando necessário resfriar a câmara escura e diminuindo ou tornando nula a potência fornecida ao ventilador enquanto o sistema precisava esquentar. A utilização desse sistema aumenta a precisão do instrumento e deve ser um ponto implementado em etapas futuras de construção.

Deixando de lado questões de precisão, o instrumento mostrou-se ineficiente em termos de consumo de energia. Como foi demonstrado na Seção 3.2 somente cerca de 15% da potência dissipada pelo aquecedor era de fato utilizada para aquecer a pastilha da câmara escura. Devido à disponibilidade de recursos, o método mais viável para o aquecedor era se utilizar um resistor de potência, porém para futuras versões do instrumento é essencial o uso de um aquecedor mais eficiente na transferência de energia. Uma forma viável de se fazer isso é embutindo o aquecedor dentro da pastilha, tornando a transferência de potência praticamente integral.

O uso de uma fonte linear também demonstrou-se ineficiente. A perda de energia térmica no regulador linear é demasiadamente alta, portanto, como já dito, é essencial

a utilização de uma fonte mais eficiente, como por exemplo fontes chaveadas.

Por fim, deve-se concluir que o instrumento teve sucesso na medição da radiação solar local. Apesar dos desvios em certas condições ambientais, os valores das medidas em condição de céu limpo se aproximaram do valor esperado pela literatura. Contudo, deve-se melhorar o projeto com o intuito de se realizar medições em condições ambientais adversas e com precisão satisfatória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRÉ, A. S.; ARAÚJO, M. V.; PERIN, A. J.; BARBI, I. Reator eletrônico auto-oscilante para lâmpadas fluorescentes com alto fator de potência utilizando buck-boost integrado. **CBA'2000**, 2000. 38
- ASCHWANDEN, M. **Physics of the solar corona: an introduction with problems and solutions**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. 3
- ASTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback systems: an introduction for scientists and engineers**. [S.l.]: Princeton university press, 2010. ix, 16, 17, 18, 19
- AVRETT, E. H. The solar temperature minimum and chromosphere. In: **Current Theoretical Models and Future High Resolution Solar Observations: Preparing for ATST**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 286, p. 419. 3
- BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 6, 25
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L.; MONSSEN, F. **Electronic devices and circuit theory**. [S.l.]: Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 2002. ix, 13, 15
- COAKLEY, J. **Reflectance and albedo, surface**. [S.l.]: Academic, 2003. 1914–1923 p. 6
- DESBOROUGH, L.; MILLER, R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring-honeywell's experience. In: NEW YORK; AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS; 1998. **AIChE symposium series**. [S.l.], 2002. p. 169–189. 16
- FANG, W.; WANG, H.; LI, H.; WANG, Y. Total solar irradiance monitor for chinese fy-3a and fy-3b satellites-instrument design. **Solar Physics**, Springer, v. 289, n. 12, p. 4711–4726, 2014. ix, 9, 10, 11, 12, 23
- FILADELFO, F. **Notas de Aula**. [S.l.: s.n.], 2016. ix, 14
- HE, S.-Z.; TAN, S.; XU, F.-L.; WANG, P.-Z. Fuzzy self-tuning of pid controllers. **Fuzzy sets and systems**, Elsevier, v. 56, n. 1, p. 37–46, 1993. 41
- HEINZEL, P.; VASILE, M.; CRISTIANA, D.; A, P. N. Understanding the solar chromosphere. In: AIP. **AIP Conference Proceedings**. [S.l.], 2008. v. 1043, n. 1, p. 238–244. 3

- KIEHL, J. T.; TRENBERTH, K. E. Earth's annual global mean energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 2, p. 197–208, 1997. xi, 8
- KOPP, G.; FEHLMANN, A.; FINSTERLE, W.; HARBER, D.; HEUERMAN, K.; WILLSON, R. Total solar irradiance data record accuracy and consistency improvements. **Metrologia**, IOP Publishing, v. 49, n. 2, p. S29, 2012. ix, 5
- KOPP, G.; LAWRENCE, G.; ROTTMAN, G. Total irradiance monitor design and on-orbit functionality. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting**. [S.l.], 2004. p. 14–25. 5, 9, 23
- LADA, C. J. Star formation in the galaxy: An observational overview. **Progress of Theoretical Physics Supplement**, Oxford University Press, v. 158, p. 1–23, 2005. 1
- MARISKA, J. T. **The solar transition region**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 3
- MELLEMA, E. **Hubble Spins a Web Into a Giant Red Spider Nebula**. 2016. ix, 1, 2
- MILONE, A.; WUENCHE, C.; RODRIGUES, C.; JABLONSKI, F.; CEPELATO, H.; VILLAS-BOAS, J.; CECCATO, J.; NETO, T. Introdução à astronomia e astrofísica. **São José dos Campos: Gráfica do INPE**, 2003. 1, 2, 3, 4
- NASA. **The Sun – Introduction**. 1999.
<https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/index.html>. Acessado: 13-07-2017. 2
- NORIS, M. F. B. M. Comparison between ziegler–nichols and cohen–coon method for controller tunings. **Faculty of Chemical & Natural Resources Engineering, University College of Engineering & Technology Malaysia, MS Thesis**, 2006. 19
- SANTOS, C. A. C. d.; SILVA, B. B. d.; RAO, T. V. R.; SATYAMURTY, P.; MANZI, A. O. Downward longwave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 26, n. 3, p. 443–450, 2011. 7
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microelectronic circuits**. [S.l.]: New York: Oxford University Press, 1998. 15

SMITH, K.; ALLEY, R. E. **Electrical circuits: an introduction**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 9

SOLANKI, S. K. Sunspots: an overview. **The Astronomy and Astrophysics Review**, Springer, v. 11, n. 2-3, p. 153–286, 2003. ix, 2, 4

WIKIPEDIA. ix, 18

WILLSON, R. C. Total solar irradiance trend during solar cycles 21 and 22. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 277, n. 5334, p. 1963–1965, 1997. 4

WOODS, T. N.; ROTTMAN, G. J.; HARDER, J. W.; LAWRENCE, G. M.; MCCLINTOCK, W. E.; KOPP, G. A.; PANKRATZ, C. Overview of the eos sorce mission. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **International Symposium on Optical Science and Technology**. [S.l.], 2000. p. 192–203. ix, 6, 7, 8