

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA
UTILIZANDO O ANEL DE SOMBREAMENTO DE MELO-
ESCOBEDO AUTOMATIZADO**

BRENO CRUZ DE GÓIS

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

JULHO - 2012

BRENO CRUZ DE GÓIS

**MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA
UTILIZANDO O ANEL DE SOMBREAMENTO DE MELO-
ESCOBEDO AUTOMATIZADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN), do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

ORIENTADOR: DR. CHIGUERU TIBA

CO-ORIENTADORA: DRA. OLGA DE CASTRO VILELA

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL

JULHO - 2012

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

G616m Góis, Breno Cruz de.
Medição da irradiância solar difusa utilizando o anel de sombreamento de Melo-Escobedo automatizado / Breno Cruz de Góis. – Recife: O Autor, 2012.
184 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.
Co-Orientadora: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares - PROTEN, 2012.
Inclui Referências Bibliográficas e Apêndices.

1. Energia Nuclear. 2. Irradiância Solar Difusa. 3. Medições Solarimétricas. 4. Disco de Sombreamento. 5. Anel de Sombreamento de Drummond. 6. Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado. I. Tiba, Chigueru. (Orientador). II. Vilela, Olga de Castro. (Co-Orientadora). III. Título.

UFPE

621.042 CDD (22. ed.)

BCTG/2012-264

**MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA UTILIZANDO O ANEL
DE SOMBREAMENTO DE MELO-ESCOBEDO AUTOMATIZADO**

Breno Cruz de Góis

APROVADA EM: 27.07.2012

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chigueru Tiba

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. Olga de Castro Vilela

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Naum Fraidenraich – DEN/UFPE

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN-UFPE

Prof. Dr. José Leonaldo de Souza – ICAT/UFAL

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Aos meus amados pais José Anderson de Góis e Tânia Lemos Cruz de Góis,
por todo amor, por toda dedicação, por estarem comigo sempre, por serem minha base e
minha força em todos os momentos de minha vida

Minha homenagem e minha gratidão

E a meus sobrinhos queridos e amados Lucas, Lívia e Vítor.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Não poderia terminar este trabalho de dissertação de mestrado sem deixar aqui meus sinceros agradecimentos a algumas pessoas que foram muito importantes durante toda esta jornada.

Inicialmente quero agradecer a Deus pela dádiva da vida e por me dar força para enfrentar desafios.

A meus pais, Anderson e Tânia, pelo incentivo constante e apoio incondicional a todos os meus projetos de vida.

A minha querida irmã, Adriana, pelo apoio, força, incentivo e colaboração neste trabalho.

A CAPES pelo incentivo financeiro.

Ao meu orientador Prof. Dr. Chigueru Tiba por me orientar e por acreditar em meu potencial.

A minha co-orientadora Prof^a. Dra. Olga de Castro Vilela pela orientação, força, apoio e colaboração.

Ao professor Dr. José Leonaldo de Sousa da UFAL por generosamente ceder uma réplica do anel de sombreamento de Melo-Escobedo.

Aos técnicos de laboratório Rinaldo e Marcelo pela colaboração, apoio e amizade e ao colega de profissão e amigo Antônio Negreiros pela inestimável colaboração.

Ao amigo e professor Dr. André Felipe Vieira da Cunha pelos valiosos aconselhamentos e colaboração.

A Magali, Nilvânia e Carla da secretaria de pós-graduação.

Aos seguranças do departamento Edvaldo, Elias, Feliciano, Jânio, Josenildo, Laelson, Rocha e Rodrigo.

Aos meus amigos Leonardo Abath, Raquel Oliveira e Marcela Durão pelos importantes gestos de incentivo e valiosas sugestões.

Aos meus amigos e colegas de departamento Ademir, Angelim, Carol, Carlos Oliveira, Cássio, Cláudia, David, Elaize, Helmut, Manoel, Gustavo Carielo, Gustavo Lima, Fernando, Jairo, Patrick e Tiago Althoff pelos momentos de descontração, pela força e pela colaboração.

A todos o meu muito obrigado!

MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA UTILIZANDO O ANEL DE SOMBREAMENTO DE MELO-ESCOBEDO AUTOMATIZADO

Autor: Breno Cruz de Góis

Orientador: Dr. Chigueru Tiba

Co- Orientadora: Dra. Olga de Castro Vilela

RESUMO

Neste trabalho foi aperfeiçoado o sistema de medição da irradiância solar chamado anel de sombreamento de Melo-Escobedo. Esse sistema consiste em um anel de sombreamento utilizado para medir as irradiâncias solares, global e difusa. A global através de um piranômetro exposto totalmente ao sol e a difusa através do sombreamento de outro piranômetro por um anel de alumínio. Um inconveniente do referido equipamento é que seu funcionamento é manual. Desta forma, há a necessidade diária de um operador para posicionar o dispositivo na posição correta, isto é, manter o piranômetro abaixo da sombra do anel, visto que esta se desloca, na direção norte-sul ou sul-norte, com o passar dos dias. Para solucionar tal problema, foi feita a automatização deste dispositivo dispensando assim a presença constante de um operador. O rastreamento da sombra é feito através de um sistema mecatrônico. O sistema é constituído de: dois piranômetros, uma plataforma com base horizontal móvel, dois fotosensores, duas chaves de fim-de-curso, um motor DC (motor de corrente contínua), painel fotovoltaico, um controlador de carga, uma bateria, um controlador lógico programável (CLP-PIC), um sistema de controle com transdutor (sensor), caixa plástica para proteger o sistema eletrônico das intempéries, um Gnomon (para determinação do norte verdadeiro ou norte geográfico), anel de sombreamento de alumínio e um sistema de aquisição de dados (datalogger). Para efeito de comparações, de modo a verificar o desempenho do protótipo, foram utilizados dois sistemas de referência: um baseado na associação de um piranômetro e um pireliômetro que foi chamado de referência 1 e outro baseado em um disco de sombreamento que foi chamado de referência 2. A comparação com o Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA) registrou desvios

máximos na ordem de -17,69% e 22,98% (referência 1) e -14,07% e 17,96% (referência 2), respectivamente para MBE e RMSE. A comparação com um Anel de Sombreamento de Drummond da Kipp Zonen registrou desvios máximos na ordem de -10,8% e 18,02% (referência 1) e 18,15% e 25,29% (referência 2), respectivamente para MBE e RMSE. Os valores de MBE e RMSE da comparação entre o Anel de Sombreamento de Drummond versus a irradiância difusa de referência citados na literatura possuem valores máximos na ordem de -12% e 18%, respectivamente, mostrando que os resultados obtidos pelo MEA foram equiparáveis. Também pode ser observado que o MEA mostrou-se superior ao Anel de Sombreamento de Drummond da Kipp Zonen. O custo de fabricação estimado do MEA foi de aproximadamente R\$1600,00, muito abaixo das configurações mais baratas existentes no mercado internacional.

Palavras-Chave: Irradiância Solar Difusa. Medições Solarimétricas. Disco de Sombreamento. Anel de Sombreamento de Drummond. Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado.

MEASUREMENT OF SOLAR DIFFUSE IRRADIANCE USING THE AUTOMATED MELO-ESCOBEDO SHADOW RING

Author: Breno Cruz de Góis

Advisor: Dr. Chigueru Tiba

Co-Advisor: Dra. Olga Castro Vilela

ABSTRACT

In this work the system for measuring solar irradiance known as Melo-Escobedo shadow ring was optimized. This system consists of a shadow ring used to measure solar irradiance - global and diffuse. The global irradiance through a pyranometer fully exposed to the sun and the diffuse one through another pyranometer shadow by a ring of aluminum. A drawback of this equipment is that its operation is manual. Thus, there is the daily need for an operator to place the device in the correct position, that is, keep the pyranometer beneath the shadow of the ring, since it moves in a north-south or south-north motion, over the days. To solve this problem it was developed an automation of this device thus eliminating the constant presence of an operator. The shadow tracking is done through a mechatronic system. The system consists of two pyranometers, a mobile platform with horizontal base, two photosensors, two end-of-course keys, a DC motor (direct current motor), photovoltaic panel, a charge controller, a battery, a programmable logic controller (PLC- PIC), a control system with a transducer (sensor), plastic box to protect the electronics from the elements, a Gnomon (for determination of true north or geographical north), aluminum shadow ring and a data acquisition system (datalogger). For purposes of comparison, to verify the performance of the prototype, it were used two reference systems: one based on a combination of a pyranometer and a pyrliometer what was called the reference 1 and another based on a shadow ball what was called the reference 2. The comparison with the Automated Melo-Escobedo shadow ring (AME) recorded maximum deviations in the order of -17,69% and 22,98% (reference 1) and -14,07% and 17,96% (reference 2), respectively for MBE and RMSE. A comparison with the Drummond Shadow Ring from Kipp & Zonen recorded maximum deviations in the order of

-10,8% and 18,02% (reference 1) and 18,15% and 25,29% (reference 2), respectively for MBE and RMSE. The MBE and RMSE values when comparing the Drummond shadow ring versus irradiance diffuse reference in the literature have maximum values at around -12% and 18%, respectively, showing the results obtained by AME were comparable. It can also be observed that the AME was superior to the Drummond Shadow Ring from Kipp & Zonen. The estimated manufacturing cost of this equipment was approximately US\$ 800.00, well below the cheapest existing settings in the international market.

Keywords: Solar Diffuse irradiance. Solarimetric measurements. Shadow Ball. Drummond shadow ring. Automated Melo-Escobedo shadow ring.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Detalhe de um concentrador heliotérmico cilindro-parabólico Adaptado de http://www.soloclima.es/aplicaciones/8-termoelectrica/138-energia-solar-termoelectrica-con-colectores-cilindrico-parabolicos.html	24
Figura 2 Tecnologia de coletores cilíndricos parabólicos - Nevada Solar One – 64 MW – Deserto de Mojave, Estados Unidos National Geographic Brasil. O Poder do Sol. Setembro 2009. 1 Fotografia	25
Figura 3 Tecnologia de coletores cilíndricos parabólicos - Usinas Andasol 1 e 2 – (Espanha) National Geographic Brasil. O Poder do Sol. Setembro 2009. 1 Fotografia	25
Figura 4 Componentes direta e difusa da irradiância solar na superfície terrestre	27
Figura 5 Movimento aparente do sol, para um observador ao sul do equador, ao longo de um ano; latitude 30°Sul	28
Figura 6 Movimento aparente do sol, para um observador ao norte do equador, ao longo de um ano; latitude 30°Norte	28
Figura 7 Movimento aparente do sol, para um observador sobre a linha do equador, ao longo de um ano; latitude 0°	29
Figura 8 Posição do sol no dia 21 de dezembro. Adaptado de http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm	30
Figura 9 Posição do sol no dia 21 de junho. Adaptado de http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm	30
Figura 10 Pireliômetro	31
Figura 11 Tipos de piranômetros; a) Piranômetro PSP (Termopilha); b)Piranômetro LICOR (Fotodiodo)	32
Figura 12 Piranômetro com dispositivo sombreador: a) Banda de sombra; b) Disco de sombreamento. Adaptado de http://www.nrel.gov/midc/solartac/pictures.html	32
Figura 13 Anel de sombreamento. Adaptado de Fraidenraich; Lyra (1995)	33

Figura 14	Anel de sombreamento de Drummond. Adaptado de Dal Pai (2005)	35
Figura 15	Anel de sombreamento de Robinson e Stoch. Adaptado de Dal Pai (2005)	36
Figura 16	Anel de sombreamento de Melo- Escobedo (ME). Adaptado de Dal Pai (2005)	36
Figura 17	Fotografia de um anel de sombreamento de Drummond da Kipp & Zonen usado como referência	38
Figura 18	Esquema do dispositivo de Drummond	39
Figura 19	Gráfico demonstrativo da variação da distância anel-detector para um anel de Drummond de raio 30 cm	40
Figura 20	Fotografia do Anel de Melo-Escobedo no campus da Universidade Federal de Alagoas – UFAL	42
Figura 21	Fotografia do mesmo Anel de ME no campus da UFAL mostrando em detalhe a manivela	43
Figura 22	Detalhe da manivela	43
Figura 23	Declinação Solar (δ) negativa	44
Figura 24	Declinação Solar (δ) positiva	45
Figura 25	Análise qualitativa do movimento aparente do sol	45
Figura 26	Posicionamento do Anel de ME sobre a linha do equador	46
Figura 27	(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) Descrição do movimento do piranômetro no anel de ME ao longo de um ano	47
Figura 28	Alinhamento da banda de sombra para latitude diferente de 0°	51
Figura 29	Esquema do dispositivo de Melo-Escobedo	52
Figura 30	Gráfico demonstrativo da variação da distância anel-piranômetro para um anel de ME de raio 30,5 cm em Recife (latitude $-8,05^\circ$)	53
Figura 31	Variação da largura de sombra W para um anel de 3 polegadas	54
Figura 32	Comparação entre os anéis de ME e Drummond	55
Figura 33	Gráfico demonstrativo da variação do Fator de Correção (F_C) isotrópico ao longo de um ano para as montagens de Drummond e ME para a latitude de Botucatu ($-22,85^\circ$), São Paulo. Adaptado de Dal Pai; Escobedo (2005)	56
Figura 34	Projeto conceitual de todo o sistema MEA	61
Figura 35	Desenho mecânico do protótipo do MEA	62
Figura 36	Variação da largura de sombra W para um anel de 2 polegadas	63

Figura 37	(a) e (b) Estrutura básica do anel de Melo-Escobedo Automatizado (MEA)	64
Figura 38	Construção da caixa de sustentação e proteção do motor DC	65
Figura 39	Motor DC BOSCH de 12 V/50W /35-50 rpm	65
Figura 40	Porcas soldadas aos eixos da base móvel	66
Figura 41	Estrutura de sustentação da base horizontal fixa	66
Figura 42	Furação das bases horizontais para comportar um piranômetro	66
Figura 43	Fixação do arco de anel de sombreamento do MEA e Gnomon	67
Figura 44	Estrutura mecânica do MEA galvanizada	67
Figura 45	Piranômetro LI-COR	68
Figura 46	Fotosensores LDR em destaque	68
Figura 47	(a) Chave fim-de-curso-norte; (b) Chave fim-de-curso-sul	69
Figura 48	Painel Fotovoltaico, controlador de carga e bateria	69
Figura 49	Controlador Lógico Programável CLP-PIC	70
Figura 50	Interface entre os LDR (fotosensores) e o CLP-PIC	70
Figura 51	Caixa plástica de proteção	71
Figura 52	Gnomon e compasso	71
Figura 53	Transferidor de ângulo acoplado ao anel de sombreamento	71
Figura 54	Sistema de aquisição de dados (datalogger)	72
Figura 55	Máquina de estado	73
Figura 56	Esquema de ligação dos relés	76
Figura 57	Posicionamento dos fotosensores em relação ao piranômetro	78
Figura 58	Interface entre os LDR e o CLP-PIC	79
Figura 59	Irradiância direta rebatida no plano horizontal	81
Figura 60	Influência do ângulo de incidência solar (ângulo zenital para superfícies planas) na resposta relativa de sensores de irradiância. Adaptado de King; Boyson; Hansen; Bower (1998) – Sandia National Laboratories – Albuquerque, New Mexico, USA	88
Figura 61	Gráfico representativo da tabela 4	89
Figura 62	Valores médios diários de MEA e Drummond versus irradiância difusa de referência	92
Figura 63	(a) Dia de céu claro (2 de janeiro). MEA x Drummond; (b) Dia de céu parcialmente nublado (26 de dezembro). MEA x Drummond; (c) Dia	93

	de céu nublado (19 de janeiro). MEA x Drummond	
Figura 64	(a) Dia de céu claro (2 de janeiro). Drummond x Referência 1; (b) Dia de céu parcialmente nublado (26 de dezembro). Drummond x Referência 1; (c) Dia de céu nublado (19 de janeiro). Drummond x Referência 1	94
Figura 65	(a) Dia de céu claro (2 de janeiro). MEA x Referência 1; (b) Dia de céu parcialmente nublado (26 de dezembro). MEA x Referência 1; (c) Dia de céu nublado (19 de janeiro). MEA x Referência 1	95
Figura 66	Irradiância global, direta, difusas de referência 1, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, método da diferença, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 02/01/2012	98
Figura 67	Irradiância difusa de referência 1, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 02/01/2012	99
Figura 68	Irradiância global, direta, difusas de referência 1, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, método da diferença, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 26/12/2011	100
Figura 69	Irradiância difusa de referência 1, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 26/12/2011	101
Figura 70	Irradiância global, direta, difusas de referência 1, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, método da diferença, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 19/01/2012	102
Figura 71	Irradiância difusa de referência 1, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 19/01/2012	103
Figura 72	Valores médios diários de MEA e Drummond versus irradiância difusa de referência 2 (disco de sombreamento)	105
Figura 73	(a) Dia de céu claro (29 de abril). MEA x Drummond; (b) Dia de céu parcialmente nublado (30 de abril). MEA x Drummond	106
Figura 74	(a) Dia de céu claro (29 de abril). Referência 2 x Drummond; (b) Dia de céu parcialmente nublado (30 de abril). Referência 2 x Drummond	107

Figura 75	(a) Dia de céu claro (29 de abril). Referência 2 x MEA; (b) Dia de céu parcialmente nublado (30 de abril). Referência 2 x MEA	108
Figura 76	Irradiância global, direta, difusas de referência 2, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, disco de sombreamento, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 29/04/2012	110
Figura 77	Irradiância difusa de referência 2, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 29/04/2012	111
Figura 78	Irradiância global, direta, difusas de referência 2, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, disco de sombreamento, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 30/04/2012	112
Figura 79	Irradiância difusa de referência 2, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 30/04/2012	113

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1	Requisitos mínimos do conhecimento da irradiação solar para o projetista de sistemas solares	21
Tabela 2	Condições de nebulosidade diária do céu em função de K_T . Baseado em Dal Pai e Escobedo (2006)	83
Tabela 3	Fatores de correção anisotrópico para o MEA. Baseado em Dal Pai e Escobedo (2006)	84
Tabela 4	Diferença no tempo de resposta entre os piranômetros PSP e LICOR	89
Tabela 5	Médias diárias da irradiância global (piranômetro), da irradiância direta horizontal (pireliômetro) e das irradiâncias difusas de referência 1, de Drummond e MEA	90
Tabela 6	Fatores de erros dos dispositivos	91
Tabela 7	MEA x Drummond, Drummond x Referência 1 e MEA x Referência 1	97
Tabela 8	Médias diárias da irradiância global (piranômetro), da irradiância direta horizontal (pireliômetro) e das irradiâncias difusas de referência 2, de Drummond e MEA	104
Tabela 9	MEA x Drummond, Drummond x Referência 2 e MEA x Referência 2	109
Tabela 10	Custo de fabricação do MEA	114

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS & SÍMBOLOS

ϕ	Latitude (ϕ): localização angular ao norte ou ao sul do equador, sendo o norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
δ	Declinação solar (δ): posição angular do sol ao meio-dia solar, isto é, quando o sol está no meridiano local, com respeito ao plano do equador, sendo o norte positivo; $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$
ω	Ângulo horário (ω): deslocamento angular do sol a leste ou a oeste do meridiano local devido à rotação da Terra em torno de seu eixo a 15° por hora, sendo pela manhã os valores negativos, e pela tarde, positivos
ω_p	Ângulo horário de pôr do sol
θ	Ângulo de incidência (θ): o ângulo entre a radiação direta em uma superfície e a normal a esta superfície
θ_z	Ângulo Zenital (θ_z): o ângulo entre a vertical e a linha para o sol, isto é, o ângulo de incidência da radiação direta para uma superfície horizontal
b	Largura do anel de sombreamento
Motor	Motor de corrente contínua (do inglês, Direct Current)
DC	
FCA	Fator de Correção Anisotrópico
FCI	Fator de Correção Isotrópico
G_{CS}	A constante solar (W/m^2)
H_G	Irradiação solar horizontal global diária
H₀	Irradiação solar horizontal extraterrestre
K_T	Índice de Claridade
MEA	Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado
n	Dia Juliano
R	Raio do anel de sombreamento
SEGS	Solar Electrical Generation Station

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. OBJETIVOS.....	23
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	24
3.1. Estado da arte das tecnologias solar FV e Termoelétrica.....	24
3.2. A irradiância solar.....	26
3.3. Descrição da trajetória aparente do sol.....	28
3.4. A solarimetria.....	30
3.5. Método do anel de sombreamento na medição da irradiância solar difusa....	33
3.6. O anel de sombreamento de Drummond.....	37
3.7. O anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME).....	41
3.8. Comparação entre os anéis de sombreamento de Drummond e Melo-Escobedo.....	55
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	58
4.1. Projeto conceitual do anel de sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA).....	58
4.1.1. Projeto da largura do anel de sombreamento do MEA.....	62
4.2. Projeto mecânico e construção da estrutura do Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA).....	64
4.3. Projeto eletrônico do Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA).....	68
4.3.1. Projeto do sistema de controle.....	72
4.3.2. Projeto eletrônico de acionamento do motor DC.....	76
4.3.3. Posicionamento do fotosensores.....	77
4.3.4. Projeto e construção do sensor.....	79
4.4. Variáveis medidas.....	80
4.4.1. Referência 1 – Associação de um piranômetro e um pireliômetro.....	80
4.4.2. Referência 2 – Disco de sombreamento.....	85
4.5. Metodologia para validação das medidas.....	85
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87

5.1. Desempenho do protótipo do Anel de Melo-Escobedo Automatizado (MEA).....	87
5.1.1. Referência 1 - Associação de um piranômetro e um pireliômetro.....	90
5.1.2. Referência 2 - Disco de sombreamento.....	104
5.2. Custo de fabricação do MEA.....	114
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
APÊNDICE A – Dados coletados com relação à referência 1 – Associação de um piranômetro e um pireliômetro.....	120
APÊNDICE B – Dados coletados com relação à referência 2 – Disco de sombreamento.....	160

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo tem crescido o uso das fontes alternativas de energia, em particular a energia solar, por ser uma forma de energia limpa por não emitir dióxido de carbono no processo de geração de eletricidade. O mundo já percebeu sua potencialidade, pois de 1984 até hoje já foram construídas usinas termoelétricas solares de grande porte (com média de potência gerada, por usina, em torno de 100 MW), tanto no sul da Espanha quanto no deserto de Mojave na Califórnia, Estados Unidos.

No Brasil, através da CHESF, foi percebido nos anos 80 que a tendência de consumo da sociedade brasileira levaria ao esgotamento do potencial hidráulico existente em algumas décadas. Nesse contexto viu-se a necessidade de avaliar o uso e desenvolvimento de fontes alternativas para a geração de energia elétrica. Assim, foi feito um estudo de 12 fontes energéticas diferentes e dentre estas estava inserida a energia solar, tanto por aproveitamento fotovoltaico (FV) quanto por aproveitamento heliotérmico, além da biomassa e da fonte eólica (INVENTÁRIO CHESF, 1980).

A eletricidade de origem solar pode ser obtida tanto pelo meio fotovoltaico quanto pelo heliotérmico. Hoje, no que diz respeito à conversão heliotérmica e FV na geração de energia elétrica, está ocorrendo uma difusão comercial em escala razoavelmente grande no plano mundial. O Brasil também deve organizar um programa de P&D (pesquisa e desenvolvimento) e formação de RH para que se construam usinas solares dentro do território nacional em poucos anos. Nesse processo é fundamental articular empresas e laboratórios nacionais em função do desenvolvimento e apropriação dessas tecnologias. As usinas solares poderão contribuir para a complementação do parque elétrico nacional com uma fonte de energia abundante, não poluente e que banha boa parte do território brasileiro. Então, com a perspectiva de difusão das centrais solares de grande porte em escala comercial, no país, nos próximos dez anos, seria apropriado ao sistema elétrico brasileiro acompanhar atentamente a evolução dessa tecnologia e avaliar detalhadamente o potencial do recurso disponível no Nordeste do Brasil. Isso porque dentre todas as variáveis importantes para a economicidade de centrais solares a mais relevante, além da eficiência do sistema, é o nível da irradiação solar.

O Brasil possui áreas com irradiação comparável às áreas onde atualmente, tanto em Almeria, na Espanha, quanto na Califórnia, Estados Unidos estão sendo construídas usinas

solares com concentração ou plano e fixo. Observa-se, por exemplo, que a cidade de Petrolina, em Pernambuco, tem uma média anual diária de irradiação solar de 2042 KWh/m²/ano que chega a ser bem próximo ao valor de Almeria com 2140 KWh/m²/ano, cidade espanhola de maior irradiação solar com usinas solares instaladas. Sendo este valor de 5,9 KWh/m²/dia perdendo apenas para o deserto de Mojave, Califórnia, Estados Unidos com 7,7 KWh/m²/dia ou 2800 KWh/m²/ano (CEPEL, 2002). Isso indica que o Brasil possui regiões propícias para a construção de usinas solares de grande porte.

Porém existe uma escassez muito grande de informações precisas sobre irradiação solar. E por isso há uma necessidade urgente de se fazer medições em diversas regiões brasileiras para ter-se um banco de dados sobre o potencial nacional em energia solar para que, de posse desses dados, se possam realizar análises mais minuciosas dos locais mais promissores para a instalação de usinas solares.

Os requisitos mínimos do conhecimento da irradiação solar para o projetista de sistemas solares e sua existência ou não no Brasil podem ser vistos na Tabela 1. Convém ressaltar que as necessidades das grandes centrais termoeletricas ou FV fixa ou com concentração são em escala horária e sub-horária.

Tabela 1 – Requisitos mínimos do conhecimento da irradiação solar para o projetista de sistemas solares

Tipo de dados	Resolução temporal	Aplicação	Uso	Situação atual
Irradiação solar global em plano inclinado	Mensal e diária	Coletor plano fixo de pequeno porte FV ou térmico	Dimensionamento, especificações e cálculos econômicos	Razoável
Irradiação solar direta normal ou difusa horizontal	Diário	Sistema de concentração média e altas temperaturas FV ou térmico Sistema FV fixo de grande porte	Dimensionamento, especificações e cálculos econômicos	Muito pouco
Irradiação solar global e direta ou difusa horizontal		Sistema de concentração média e altas temperaturas FV ou térmico Sistema FV fixo de grande porte	Simulação e análise econômica detalhada	Muito pouco

Uma estação solarimétrica em conformidade com a Tabela 1 tem custos da ordem de US\$14.000 a US\$50.000, conforme o grau de automatização e precisão. Nesse sentido é

impensável (por restrição econômica) cogitar uma rede extensa e densa com configuração de média ou alta precisão.

Dentro deste contexto, este trabalho de dissertação tem por objetivo contribuir na viabilização das medições solares automatizando a medição da componente difusa da irradiação solar pelo método de sombreamento de Melo-Escobedo.

2. *OBJETIVOS*

a) **Objetivo geral**

Desenvolvimento de um sistema de medição da irradiância solar difusa automatizado de baixo custo baseado no anel de sombreamento de Melo-Escobedo.

b) **Objetivos específicos**

Projeto e construção de um arranjo no qual foram medidas simultaneamente a irradiância solar direta através de um pireliômetro, a irradiância solar global através de um piranômetro e a irradiância solar difusa medida pelo anel de sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA).

Validação do MEA através da comparação da irradiância difusa medida por ele com a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento de Drummond e com a irradiância difusa real ou de referência obtida a partir de dois métodos: a associação de um pireliômetro e um piranômetro e com a utilização de um disco de sombreamento.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Estado da arte das tecnologias solar FV e Termoelétrica

No início de 2009, no Brasil, a conversão solar termoelétrica e FV de grandes pacotes de energia era uma área praticamente inexistente na agenda dos organismos oficiais de ciência e tecnologia nacionais. Falava-se de energia solar térmica com referência aos coletores solares planos para aquecimento de água ou sistema FV autônomo de pequeno porte para aplicações diversas.

No que diz respeito à geração de energia elétrica, a tecnologia de conversão heliotérmica é a que se apresenta como a que tem maior experiência comercial acumulada. Como exemplo, cita-se as Estações Solares de Geração Elétrica (SEGS, em inglês) com 354 megawatts de potência instalada na Califórnia, baseadas em usinas com capacidade nominal de 14 a 80 MW, que iniciaram operação entre 1984 e 1991, Figuras 1 e 2.



Figura 1 - Detalhe de um concentrador heliotérmico cilindro-parabólico

Adaptado de <http://www.soliclima.es/aplicaciones/8-termoelectrica/138-energia-solar-termoelectrica-con-colectores-cilindrico-parabolicos.html>



Figura 2 - Tecnologia de coletores cilíndricos parabólicos - Nevada Solar One – 64 MW –
Deserto de Mojave, Estados Unidos
National Geographic Brasil. O Poder do Sol. Setembro 2009.

Atualmente toda uma nova geração de concentradores solares parabólicos foi desenvolvida entre 2008 e 2011. Aproximadamente cerca de 650 MW foram acrescentados, principalmente na Espanha, Figura 3.



Figura 3 - Tecnologia de coletores cilíndricos parabólicos - Usinas Andasol 1 e 2 –
(Espanha)
National Geographic Brasil. O Poder do Sol. Setembro 2009.

A eletricidade fotovoltaica está se tornando uma fonte de energia limpa para a Terra em larga escala. As usinas solares FV conectadas à rede em dezembro de 2011 eram de 67,4 GW

acumulados. O tamanho das centrais fotovoltaicas também está aumentando. Em dezembro de 2011 as 03 maiores centrais fotovoltaicas em operação tinham uma potência de pico entre 97 a 200 MW: “Huanghe Hydropower Golmud Solar Park” (China, 200 MW), “Perovo Solar park” (Ucrânia, 100 MW) e “Sarnia Solar Park” (Canadá, 97 MW). Na medida em que as centrais FV crescem de tamanho e aumenta sua inserção comercial, a escolha de local para sua implantação torna-se um elemento importante da sua competitividade (TIBA; BELTRÃO, 2012).

3.2 A irradiância solar

Irradiância (Watts/m^2) é a potência radiante incidente em uma superfície por unidade de área; irradiação (Joules/m^2) é a energia incidente por unidade de área. A irradiância solar é composta por duas componentes: a irradiância direta e a irradiância difusa. De acordo com Duffie e Beckman (1991), a irradiância direta é a irradiância recebida do sol sem ter sido espalhada pela atmosfera, atingindo a superfície num ângulo de incidência normal a sua propagação enquanto que a irradiância difusa é a irradiância recebida do sol depois que sua direção foi mudada, devido ao espalhamento por gases e partículas suspensas na atmosfera e por multi-reflexões ocorridas na própria atmosfera.

O espalhamento da radiação é classificado em função do tamanho das partículas em relação ao comprimento de onda da radiação incidente: espalhamento Rayleigh, para partículas da ordem de 10% do tamanho do comprimento de onda incidente e espalhamento Mie, para partículas da ordem do comprimento de onda. O espalhamento Rayleigh é causado principalmente pela interação com os gases oxigênio e nitrogênio e ocorre para situações de atmosfera limpa e livre de poluição. Esse espalhamento é conhecido como **espalhamento isotrópico**, pois a radiação é espalhada uniformemente tanto no sentido atmosfera-solo como no sentido atmosfera-espaco. O espalhamento Mie é causado por aerossóis e vapor d' água, ocorrendo, portanto, para situações de atmosferas poluídas e túrbidas. O espalhamento causado por partículas maiores deixa de ser uniforme, havendo um maior fluxo radiativo no sentido atmosfera-solo do que atmosfera-espaco. Esse efeito recebe o nome de **anisotropia da radiação**, e é mais marcante na região em torno da aureola solar, causando o surgimento da radiação circunsolar, computada na forma de radiação difusa (DAL PAI, 2005, grifo nosso).

A soma da irradiância solar direta com a irradiância difusa em uma superfície é conhecida como irradiância solar global.

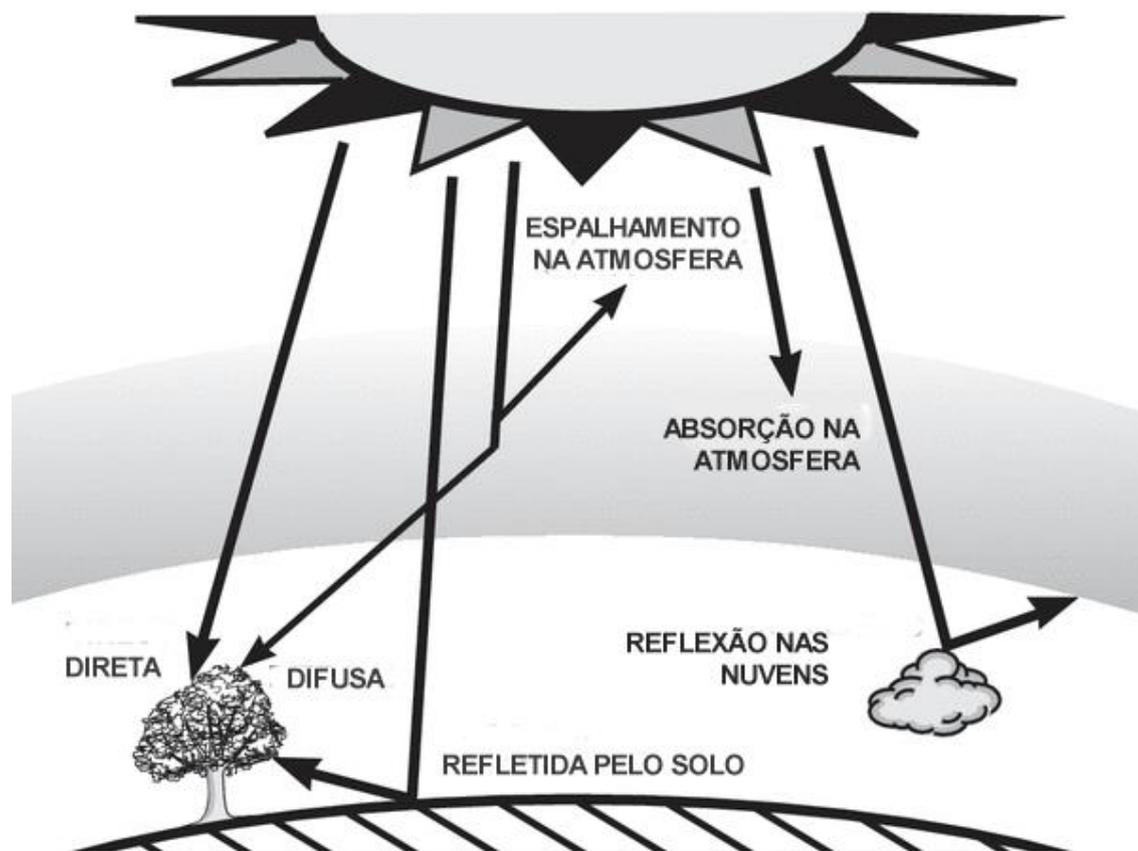


Figura 4 - Componentes direta e difusa da irradiância solar na superfície terrestre

Ainda de acordo com Duffie e Beckman (1991), a irradiância emitida pelo sol e sua relação espacial com a Terra resulta em uma intensidade fixa aproximada de irradiância solar fora da atmosfera terrestre chamada de Constante Solar. A Constante Solar representa a energia do sol incidente sobre uma superfície unitária plana perpendicular à direção de propagação dos raios solares, fora da atmosfera. O Centro de Radiação Mundial (WRC, na sigla em inglês) adotou o valor de 1367 W/m^2 (DUNCAN *et al*, 1982 apud DUFFIE; BECKMAN,1991) com uma incerteza da ordem de 1% para o valor da constante solar.

A potência que atinge o solo é naturalmente menor, por causa da absorção e reflexão atmosférica. Nos cálculos e projetos, considera-se a potência incidente na direção normal aos raios solares, com céu limpo e ao meio dia, o valor médio de 1000 W/m^2 (MELO, 1993).

3.3 Descrição da trajetória aparente do sol

Devido aos movimentos de translação da Terra em torno do sol e de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, gera-se um movimento aparente do sol no céu com relação a um observador sobre o plano terrestre. Os movimentos aparentes gerados são o nascer e o pôr do sol no sentido leste – oeste, devido ao movimento de rotação, e o movimento em que o sol varia sua posição de sul para o norte e de norte para o sul, a depender do dia do ano, devido ao movimento de translação da Terra e ao fato de que o plano do equador terrestre forma um ângulo de $23^{\circ} 27'$ com o plano da eclíptica. Sendo a eclíptica o plano determinado pela trajetória da Terra em torno do sol.

O plano que contém o arco de circunferência descrito pelo sol em seu movimento aparente no céu, varia sua angulação com relação à vertical local para latitudes diferentes da latitude do equador. Esse plano se inclina para o norte, caso o observador esteja ao sul da linha do equador e se inclina para o sul caso esteja ao norte do equador, Figuras 5 e 6.

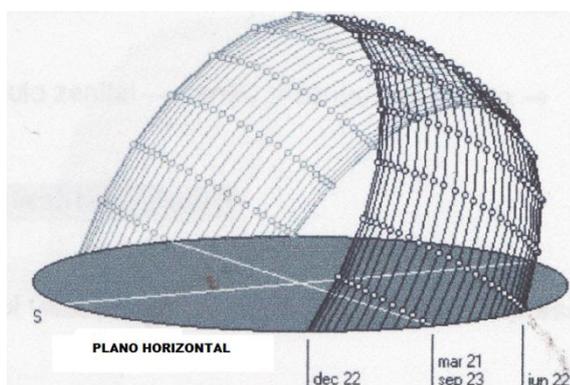


Figura 5 - Movimento aparente do sol, para um observador ao sul do equador, ao longo de um ano; latitude 30° Sul

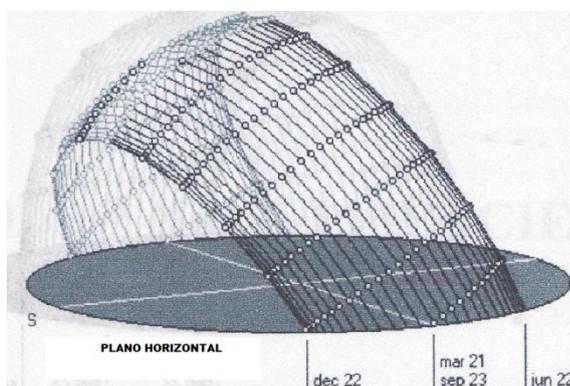


Figura 6 - Movimento aparente do sol, para um observador ao norte do equador, ao longo de um ano; latitude 30° Norte

Mas se o observador estiver sobre a linha do Equador, em qualquer ponto do planeta, o plano que contém o arco de circunferência descrito pelo sol permanece perpendicular ao plano do observador, Figura 7.

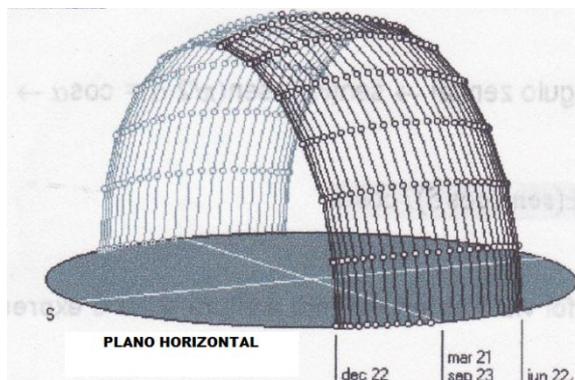


Figura 7 - Movimento aparente do sol, para um observador sobre a linha do equador, ao longo de um ano; latitude 0°

A inclinação desse arco de circunferência descrito pelo sol, em relação à vertical local, é exatamente igual à latitude do local com sinal negativo. Para Recife (latitude $-8^\circ 03'$), local onde foram feitas as medidas deste trabalho, a inclinação será de $8^\circ 03'$ norte (ou $+8^\circ 03'$).

O raio do sol chega à superfície da Terra com uma inclinação delta (δ), em relação ao plano do equador terrestre, para cada dia do ano e que se chama declinação solar. Esta declinação solar pode ser positiva ou negativa variando de $-23,45^\circ$ a $+23,45^\circ$. A inclinação do eixo polar da Terra, com relação ao plano da eclíptica, é o que determina essa declinação determinando uma variação norte-sul, sul-norte no movimento aparente do sol ao longo do ano. De modo que no dia 21 de dezembro os raios solares fazem um ângulo de $-23,45^\circ$ com o plano do equador (Figura 8). No dia 21 de junho o ângulo é igual a $+23,45^\circ$ (Figura 9). A varredura que o movimento aparente do sol faz no céu de dezembro a junho (ou de junho a dezembro) é uma constante igual a $46,9^\circ$.



Figura 8 – Posição do sol no dia 21 de dezembro. Adaptado de

<http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>



Figura 9 – Posição do sol no dia 21 de junho. Adaptado de

<http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>

3.4 A solarimetria

A solarimetria é a ciência que mede e estuda a irradiância global e suas componentes, direta e difusa.

A informação adequada sobre o recurso solar incidente sobre a superfície terrestre é muito importante para uma diversidade de áreas tecnológicas tais como: agricultura, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e particularmente para a engenharia solar. Na conversão da energia solar em outras formas de energia utilizadas pela sociedade, a

informação sobre o recurso solar é o requisito fundamental para o dimensionamento de sistemas solares energéticos e, portanto, o seu melhor conhecimento significa um projeto mais preciso e econômico (TIBA, 2000, p. xvii).

Siqueira (2008, p.21), afirma sobre a tecnologia solar que,

[...] o desenvolvimento e a difusão ampla dessa tecnologia depende fortemente da economicidade e confiabilidade dos sistemas solares instalados, seja em escala restrita ou ampla. Tais requisitos poderão ser alcançados na medida em que se conheça precisamente o recurso solar disponível localmente, pré-requisito básico para a elaboração de projetos de sistemas solares adequadamente dimensionados.

Os instrumentos ou arranjos utilizados na solarimetria, para medição da irradiância solar, apresentam quatro configurações básicas:

- O pireliômetro: instrumento de medição que mede a componente direta da irradiância solar com o auxílio de um dispositivo rastreador que segue o movimento do sol com incerteza de 5%, Figura 10.



Figura 10 – Pireliômetro

- O piranômetro: instrumento para medir a irradiância solar global, direta mais difusa, usualmente em uma superfície horizontal com incerteza de 5%. Pode ser do tipo termoelétrico, Figura 11-a ou fotovoltaico, Figura 11-b;
- O piranômetro com dispositivo sombreador (anel de sombreamento ou disco), Figura 12. A diferença dos valores medidos pelo piranômetro e pelo piranômetro com banda de sombra ou disco resulta na irradiância direta.
- Uso simultâneo de um pireliômetro e um piranômetro para estimar a irradiância difusa horizontal.

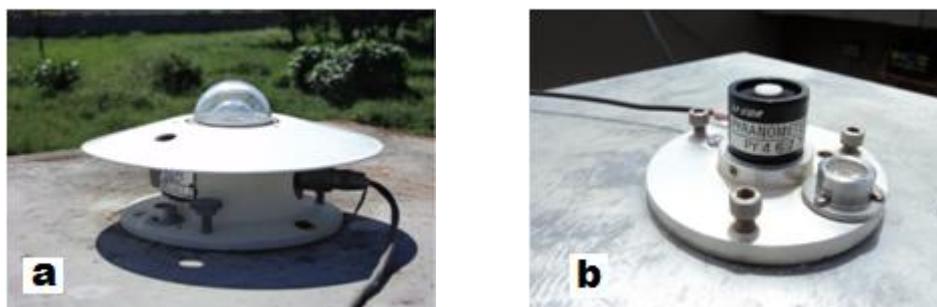


Figura 11 – Tipos de piranômetros; a) Piranômetro PSP (Termopilha); b)Piranômetro LICOR (Fotodiodo)

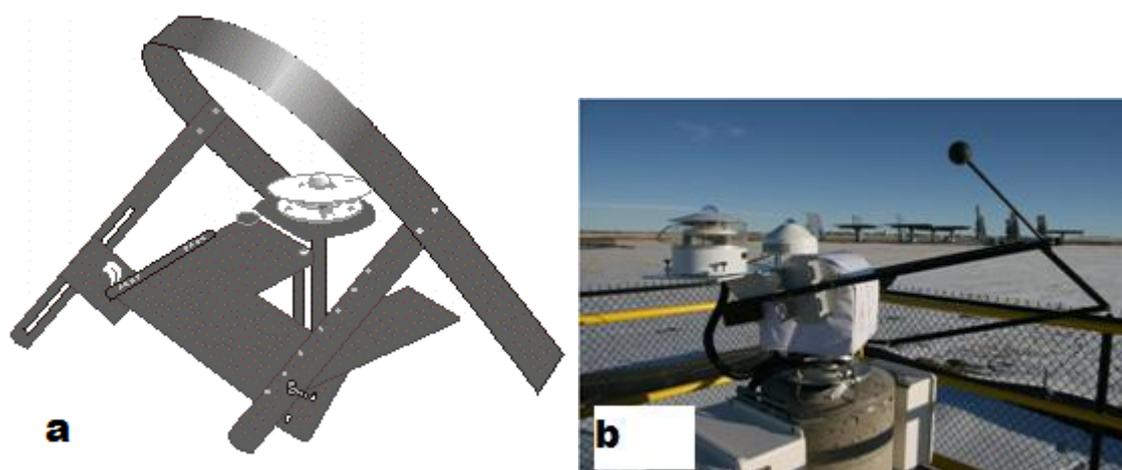


Figura 12 – Piranômetro com dispositivo sombreador: a) Banda de sombra; b) Disco de sombreamento. Adaptado de <http://www.nrel.gov/midc/solartac/pictures.html>

As irradiações global, difusa e direta guardam entre si as seguintes relações:

$$I_G = I_{DH} + I_{DF} \quad (1)$$

$$I_{DH} = I_{DN} * \cos(\theta_Z) = I_G - I_{DF} \quad (2)$$

onde I_{DH} é a irradiância direta no plano horizontal, I_{DN} a irradiância direta com a incidência normal, θ_Z o ângulo zenital, I_G a irradiância global e I_{DF} a irradiância difusa no plano horizontal.

3.5 Método do anel de sombreamento na medição da irradiância solar difusa

As medições da irradiância difusa são realizadas com piranômetros [...], cujos sensores se encontram sombreados por uma banda ou disco, de forma a bloquear a irradiância solar direta. O mais tradicional é o uso da banda de sombra em forma de aro ou semiaro, colocada em paralelo com o plano do equador terrestre. Desta forma o sensor estará protegido durante todo o dia (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995), Figuras 12 e 13.

O custo da banda de sombra é relativamente baixo e sua montagem é simples. Porém, devido a que a banda também bloqueia parte da própria radiação difusa, é necessário se proceder a uma correção das leituras. Esta correção oscila, em geral, entre 5 e 25%, apresentando uma grande variabilidade, dependendo de: dimensões geométricas da banda; latitude; época do ano; turbidez atmosférica e grau de nebulosidade; albedo das superfícies vizinhas e refletividade da superfície interna da banda. Existem várias propostas de fórmulas para realizar esta correção. (ATIENZA, 1993 apud FRAIDENRAICH; LYRA, 1995, p.98-99).

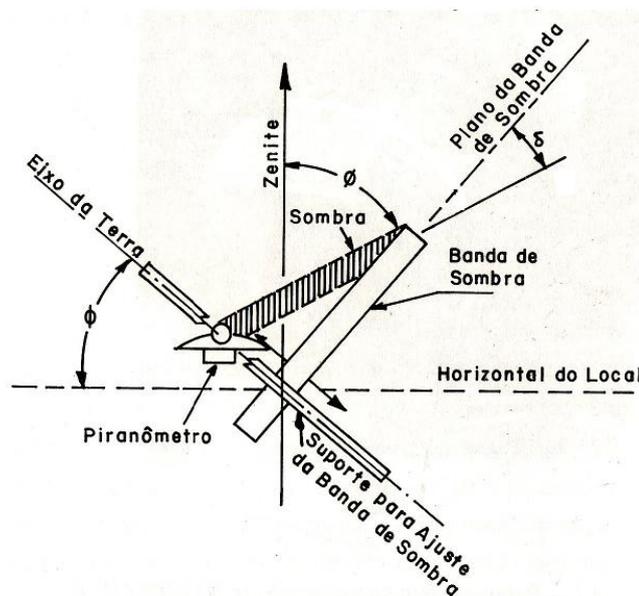


Figura 13 – Anel de sombreamento. Adaptado de Fraidenraich; Lyra (1995)

A maior vantagem do anel de sombreamento é que ele é de fácil operação e fornece uma estimativa direta da componente difusa da radiação solar. A maior desvantagem é a sistemática baixa estimativa da radiação solar difusa devido ao efeito de bloqueio causado pelo anel (STEVEN; UNSWORTH, 1980; LE BARON et al., 1990 apud OLIVEIRA et al., 2002).

Atienza, G.G. *Instrumentación Solarimétrica*. Argentina, Centro de Investigaciones de Recursos Naturales – Instituto de Clima y Agua, 1993.

LeBaron, B.A., W.A. Peterson, e I. Dirmhirn, 1980: *Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands*. Sol. Energy, 25, 1-13.

Steven, M.D., 1984: *The anisotropy of diffuse solar radiation determined from shade-ring measurements*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 110, 261-270.

M. H. Unsworth, 1980: *Shade-ring corrections for pyranometer measurements of diffuse solar radiation from cloudless skies*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106, 865-872.

A correção da irradiância solar difusa medida debaixo do anel de sombreamento (I_d^*) é estimada considerando a razão entre a parte da irradiância difusa bloqueada ($I_{d,BLOQUEADA}$) em relação ao valor real da irradiância difusa (I_d) de acordo com a seguinte relação:

$$F_C = \frac{I_d}{I_d^*} = (1 - F_P)^{-1} \quad (3)$$

$$F_P = \frac{I_{d,BLOQUEADA}}{I_d} \quad (4)$$

Sendo F_P a fração de perda.

F_C é conhecido como Fator de Correção, sendo $F_C > 1$, podendo ser estimado analiticamente considerando a irradiância solar difusa isotrópica (OLIVEIRA *et al.*, 2002). Uma vez que o campo da irradiância solar difusa é raramente isotrópico, o uso de anéis de sombreamento pede por um melhor e mais detalhado tratamento no que concerne ao efeito da anisotropia da irradiância difusa nos resultados das medidas feitas por esses tipos de aparelho. Esta anisotropia deve-se basicamente à variação horizontal no albedo (radiação refletida no plano horizontal) superficial, e a distribuição desigual de nuvens sendo estas as fontes principais de anisotropia (BATTLES *et al.*, 1995 apud OLIVEIRA *et al.*, 2002).

A inclusão de outros efeitos como a anisotropia e reflexões múltiplas de elementos do anel de sombreamento no Fator de Correção só pode ser feita numericamente e na maioria das vezes depende fortemente de expressões empíricas (LE BARON *et al.*, 1980, 1990; STEVEN, 1984; RAWLINS; READINGS, 1986; BATTLES *et al.*, 1995 apud OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Embora os pireliômetros e os discos de sombreamento (dispositivos de rastreamento do sol) sejam mais sofisticados, eles fornecem melhores estimativas da irradiância solar difusa apenas nas condições de céu claro. Em dias totalmente nublados os anéis de sombreamento oferecem resultados comparáveis (INEICHEN *et al.*, 1983 apud OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Battles, F.J., F.J. Olmo. and L. Alados-Arboledas, 1995: **On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements**. Sol.Energy. 54,105-114.
 Ineichen, P.J.M. Grenaud, O. Guisan, e A. Mermoud, 1983: **Study of the corrective factor involved when measuring the diffuse solar radiation by the use of the ring method**. Sol.Energy, 31, 113-117.
 Rawlins, F. e C.J. Readings, 1986: **The shade ring correction for measurements of diffuse irradiance under clear skies**. Sol.Energy, 37, 407-416.

Além disso, os anéis de sombreamento requerem mínimo ajuste para compensar a evolução da largura da sombra e de sua posição podendo assim ser operados continuamente por longos períodos de tempo, característica esta fundamental para estudos climáticos. Também devido a sua simplicidade, os anéis de sombreamento custam muito menos que outros aparelhos mais sofisticados (OLIVEIRA *et al.*, 2002).

A maioria das medições da irradiância solar difusa disponíveis ao redor do mundo são baseadas nos anéis de sombreamento propostos por Drummond (1956) (Figura 14) ou Robinson e Stoch (1964) (Figura 15), possuindo princípios operacionais diferentes. O aparelho proposto por Robinson consiste de um anel com movimento de rotação em torno de seu centro que cobre diferentes setores da esfera celestrial. No aparelho proposto por Drummond, um único anel é deslocado ao longo da direção do eixo da Terra para compensar a variação diária da declinação solar. Em ambos os casos o detector é mantido fixo (OLIVEIRA *et al.*, 2002). “Das duas montagens, a de Drummond é atualmente a mais utilizada e comercializada” (DAL PAI, 2005).

Uma proposta recente vem atraindo diversos setores das áreas de conversão energética no sentido da facilidade de montagem, manutenção e operação, que é o método do anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME) (Figura 16) cujo princípio de operação é inverso à montagem de Drummond. Nesse método de medida da irradiância difusa, o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado, com relação à vertical local, na latitude do observador e o sensor (piranômetro), posicionado no plano horizontal, translada paralelamente ao plano do horizonte local para compensar a variação da declinação solar (DAL PAI, 2005).

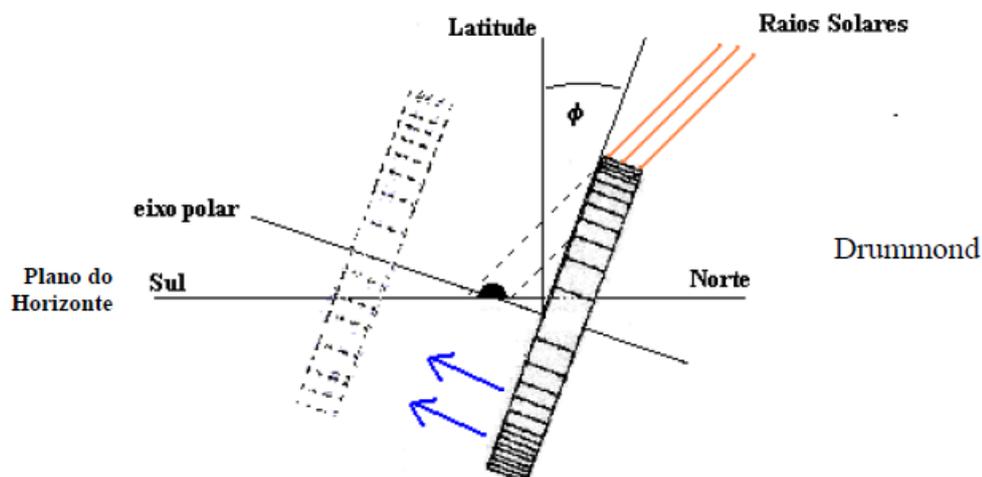


Figura 14 – Anel de sombreamento de Drummond. Adaptado de Dal Pai (2005)

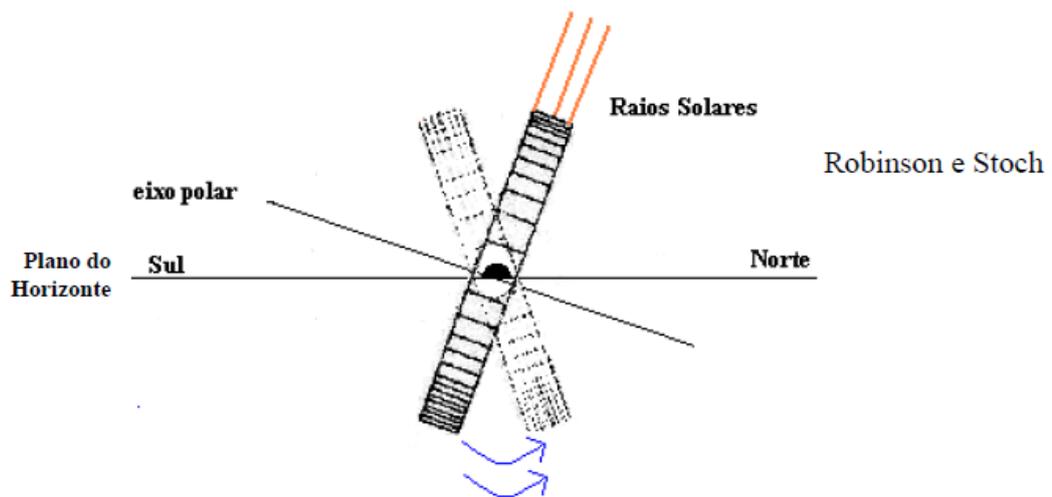


Figura 15 – Anel de sombreamento de Robinson e Stoch. Adaptado de Dal Pai (2005)

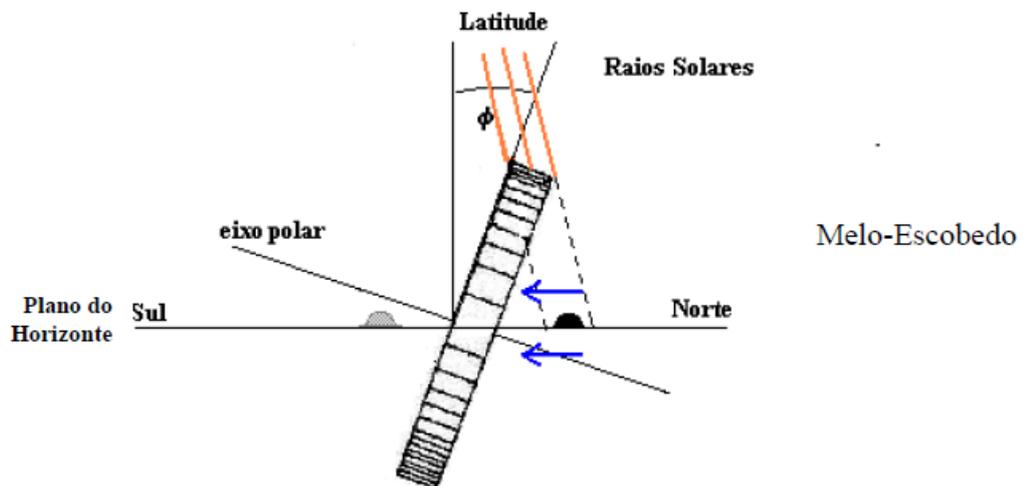


Figura 16 – Anel de sombreamento de Melo- Escobedo (ME). Adaptado de Dal Pai (2005)

Para os anéis de Drummond e Robinson, a fração de perda (F_p), citada na Equação (4), é baseada na isotropia da irradiância, e leva em consideração apenas o uso de fatores geométricos (raio e largura do anel) e geográficos (latitude e declinação solar), dada pelas Equações (5) e (6), respectivamente. Para a montagem ME, Oliveira *et al* (2002a apud DAL PAI,2005) desenvolveram analiticamente a fração de perda para o anel (Equação (7)) em função de parâmetros geométricos e geográficos (DAL PAI, 2005).

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) [\cos \delta]^3 \int_0^{\omega_p} \cos(\theta_z) d\omega \quad (5)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cos \delta \int_0^{\omega_p} \cos(\theta_z) d\omega \quad (6)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cos \delta \left[\frac{\cos(\phi - \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(\theta_z) d\omega \quad (7)$$

Diversos pesquisadores têm mostrado que a aplicação da correção isotrópica (Equações (5), (6) e (7)) não contempla efeitos atmosféricos (turbidez, nebulosidade, poluição, vapor d' água) que são responsáveis pela anisotropia na radiação difusa. Nesse sentido, Kasten *et al.* (1983 apud DAL PAI,2005) e Pollard e Langevine (1988 apud DAL PAI,2005) introduziram correções baseadas em parâmetros anisotrópicos como índice de claridade K_T (razão entre a radiação global e a radiação extraterrestre), ângulo zenital e turbidez atmosférica associados a correção isotrópica para melhorar a precisão da medida da irradiância difusa pelo anel de sombreamento de Drummond. [...] Painter (1981) e Stanhill (1985) verificaram que as correções anisotrópicas apresentaram dependência sazonal, causadas principalmente pelos diferentes tamanhos e níveis de concentração de aerossóis na atmosfera. Síren (1987) relacionou a correção anisotrópica com a razão largura-raio do anel de sombreamento e verificou que quanto menor for a razão, menor será a correção anisotrópica. Le Baron *et al.* (1990) propuseram modelos de correção anisotrópica da irradiância difusa para anel de sombreamento por meio da combinação de três parâmetros anisotrópicos (ângulo zenital, índice de claridade e brilho solar) e um parâmetro isotrópico (geométrico e geográfico), destacando o índice de claridade como o parâmetro mais significativo na representação das condições anisotrópicas do céu [...] (DAL PAI, 2005).

3.6 O anel de sombreamento de Drummond

O anel de sombreamento proposto por Drummond consiste num único anel deslocado ao longo da direção do eixo da Terra de modo a compensar a variação diária da declinação solar (DRUMMOND, 1964 apud OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Kasten, F., Dehne, K., Bretschneider, W. **Improvement of measurement of diffuse solar radiation.** Solar radiation data, série F, n.2, p.221-5, D.Redel, Dordrecht, 1983.

Pollard, D.G. e Langevine, L.P. **An anisotropic correction for diffuse irradiance measurements in Guyana.** In: Proceeding of the 1988 Annual Meeting, M.J.Coleman (Ed.), P. 238-43, ASES Cambridge, 1988.

Painter, H.E. **The shade ring correction for diffuse irradiance measurements.** Solar Energy, v.26, p. 361-3, 1981.

Stanhill, G. **Observations of shade-ring correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v.111, p.1125-30, 1985.

Síren, K.E. **The shadow band correction for diffuse irradiation based on a two-component sky radiance model.** Solar Energy, V.39, n.5, p.433-8, 1987.

Drummond, A.J., 1964: Comments on "Sky radiation measurement and corrections." J.Appl.Meteor., 3, 810-811

O detector (piranômetro) é mantido fixo e o anel é movido no sentido norte-sul ou sul-norte a depender da época do ano em uma direção paralela ao eixo polar da Terra (Figura 17). O fator de correção isotrópico para o anel de sombreamento de Drummond é dado pela equação seguinte:

$$F_C = \left\{ 1 - \left(\frac{2b}{\pi R} [\cos(\delta)]^3 \int_0^{\omega_p} \cos(\theta_z) d\omega \right) \right\}^{-1} \quad (8)$$

A Equação (8) é o resultado da substituição da Equação (5) (fração de perda isotrópica) na Equação (3) que é a expressão geral para o fator de correção isotrópico. Resolvendo a integral resulta na Equação (9):

$$F_{C,Drum} = \left\{ 1 - \left(\frac{2b}{\pi R} [\cos(\delta)]^3 (\cos(\phi)\cos(\delta)\text{sen}(\omega_p) + \omega_p\text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta)) \right) \right\}^{-1} \quad (9)$$



Figura 17– Fotografia de um anel de sombreamento de Drummond da Kipp & Zonen usado como referência

Como é visto na Figura 18, no anel de sombreamento de Drummond, a trajetória do raio direto do sol com inclinação δ em relação ao plano do equador é bloqueada pelo anel de largura “b”, formando uma sombra de largura “W” sobre o detector durante o nascer e o pôr-do-sol. O detector permanece sombreado durante um dia inteiro porque o anel é colocado com uma inclinação, em relação à vertical local, igual ao negativo da latitude (ϕ) do lugar em que se encontra o aparelho fazendo paralelo ao plano do equador terrestre o plano que contém a

banda de sombra. Inclinado para o norte caso esteja no hemisfério sul e inclinado para o sul caso esteja no hemisfério norte. Como exemplo, se o aparelho estiver na latitude 0° (linha do equador) a inclinação será de 0° (zero graus) permanecendo, o plano que contém o anel, perpendicular a linha de horizonte local. A particularidade do anel de sombreado de Drummond é que para fazer o sombreado devido ao deslocamento diário do sol para o norte ou para o sul com o passar dos dias faz-se o deslocamento do anel para o norte ou para o sul, numa direção paralela ao eixo polar da Terra, de modo a compensar a variação da declinação solar anual.

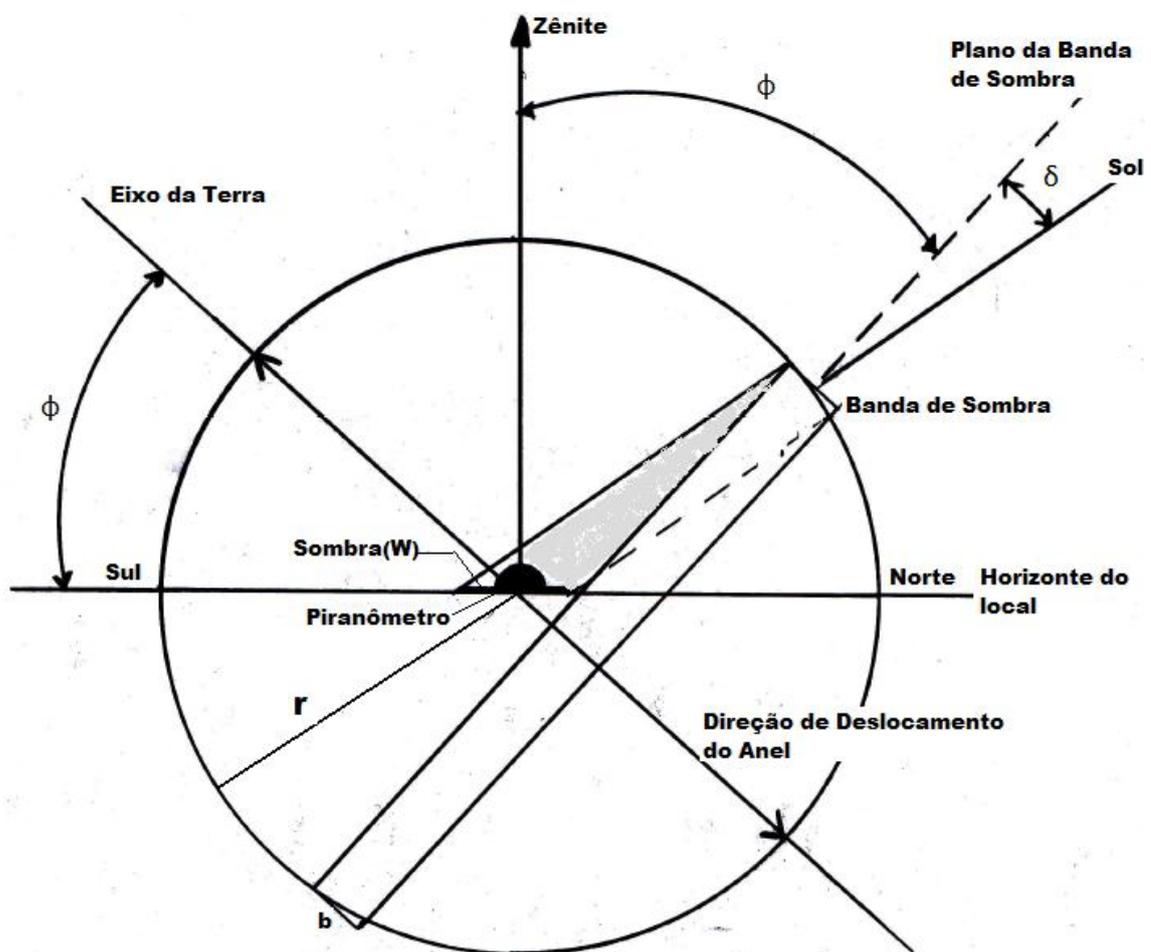


Figura 18 – Esquema do dispositivo de Drummond

A distância “r” do detector a extremidade do anel varia de acordo com a equação seguinte:

$$r = \frac{R}{\cos(\delta)} \quad (10)$$

onde R é o raio do anel de sombreamento e δ a declinação solar do sol.

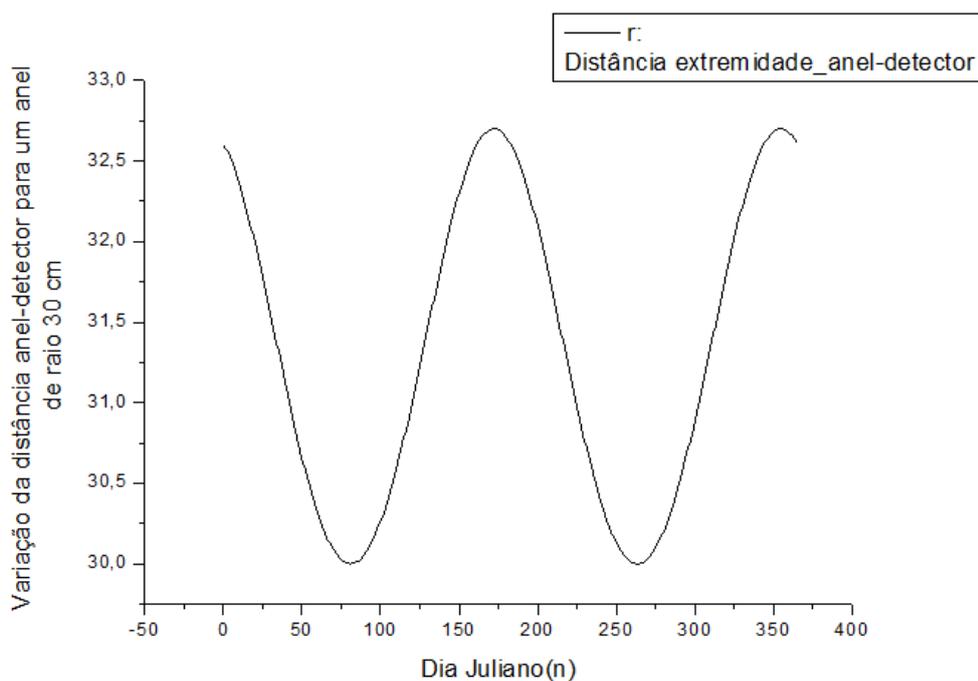


Figura 19 – Gráfico demonstrativo da variação da distância anel-detector para um anel de Drummond de raio 30 cm

O gráfico mostra que em um anel de sombreamento de Drummond nos equinócios dias Julianos 80 e 264 (21 de março e 21 de setembro, respectivamente) têm-se os valores mínimos da distância anel-detector e que equivalem ao valor do raio do anel. Mostra também que nos solstícios dias Julianos 172 e 355 (21 de junho e 21 de dezembro, respectivamente) há a variação máxima de r . A largura da sombra formada sobre o detector é dada pela Equação (11):

$$W = \frac{b \cos(\delta)}{\cos(\phi - \delta)} \quad (11)$$

onde b é a largura do anel de sombreamento.

3.7 O anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME)

O anel de sombreamento de Melo-Escobedo é um procedimento mais simplificado de medição da irradiância solar difusa. Este aparelho, desenvolvido no Laboratório de Radiação Solar na Universidade Estadual de São Paulo em Botucatu, Brasil (UNESP) (MELO, 1993; ESCOBEDO *et al.* 1997 apud OLIVEIRA *et al.*, 2002), é a mais recente tecnologia de anel de sombreamento. O anel é fixo, e inclinado em relação à vertical local, com ângulo igual à latitude em que se encontra o dispositivo e a variação diária da posição da sombra é seguida ao se deslocar o detector (piranômetro) horizontalmente (Figura 20) (OLIVEIRA *et al.*, 2002).

O piranômetro é deslocado **manualmente**, em um plano horizontal, por um mecanismo que permite que o detector sempre esteja centralizado debaixo da sombra projetada pelo anel. Essa característica única faz do anel de ME um dispositivo mais simples de se operar que outros aparelhos similares (OLIVEIRA *et al.*, 2002, grifo nosso). Este sistema de medição solar tem o objetivo de estimar a irradiância solar direta a partir da medição da irradiância solar difusa e global no plano horizontal. Baseia-se na diferença entre a irradiância global e a irradiância difusa obtendo-se ponto a ponto a irradiância solar direta. O uso de um pireliômetro com rastreador (seguimento solar automático) para medir a irradiância solar direta tem um custo bem maior.

O anel de sombreamento com raio pré-determinado é fixado a uma plataforma com base horizontal móvel, guiada por um parafuso sem fim com seu eixo orientado paralelamente à direção norte-sul geográfico. O deslocamento da base horizontal se dá através do uso de uma **manivela**, Figuras 21 e 22. O anel projeta uma faixa sombreada no plano horizontal, cobrindo o sensor de um dos piranômetros e desta forma bloqueando a irradiância direta e medindo apenas a irradiância difusa do sol.

Este piranômetro, que mede a irradiância difusa, está montado em cima da base horizontal móvel; esta base, por ser móvel garante que o piranômetro permaneça sempre isolado da irradiância direta. Para tal, a base móvel deve acompanhar o deslocamento da posição da sombra do anel, nos sentidos norte-sul ou sul-norte, devido ao deslocamento aparente do sol nessa direção, com o passar dos dias.

Escobedo, J.F., V. A. Frisina, M.A. Chaves, e A.P. Oliveira, 1997: **Radiômetros solares com termopilhas de filmes Finos II** Desempenho. Rev. Bras. Aplicações Vácuo, 16, 16-21.

O equipamento de Melo-Escobedo é constituído por:

- Dois piranômetros posicionados em duas plataformas diferentes, sendo uma com base horizontal móvel e outra com base fixa;
- Anel de sombreamento;
- Um sistema de aquisição de dados (“Datalogger”);
- Um microcomputador.

Os dois piranômetros são ligados ao sistema de aquisição de dados, programado para efetuar uma leitura a cada segundo. Após sessenta leituras é armazenada a média de cada canal; isto permite medir diariamente as irradiações, global e difusa, e por diferença, ponto a ponto, obter-se a estimativa da irradiância direta, como já mencionado.

A periodicidade de deslocamento do sensor depende da largura da faixa sombreada que, por sua vez, depende das dimensões do anel e do raio do sensor. Como não existe uma padronização nas dimensões do sensor, não é possível padronizar as dimensões do anel. Uma boa indicação para as dimensões do anel, segundo Burek *et al.* (1988 apud MELO, 1993) é tomar a razão entre a largura e o raio equivalente a $\frac{1}{4}$ (MELO, 1993,p.66-67).



Figura 20 - Fotografia do Anel de Melo-Escobedo no campus da Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Fato importante a ser destacado é o uso da manivela para o posicionamento do sensor. Sendo desta forma necessária a presença constante, quase diária, de um operador para manter o sensor sempre abaixo da sombra projetada pelo anel. O operador terá uma autonomia maior, dois ou três dias, a depender da largura do anel, mas para um anel mais largo se ganha em autonomia, mas perde-se em precisão na medida da irradiância difusa.



Figura 21 - Fotografia do mesmo Anel de ME no campus da UFAL mostrando em detalhe a manivela

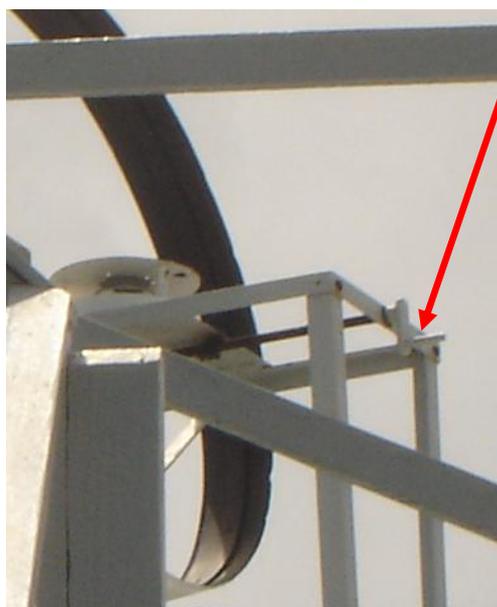


Figura 22 - Detalhe da manivela

O efeito anisotrópico certamente afeta as medições da irradiância solar difusa em dispositivos de anel-de-sombreamento. Mesmo que o detector seja mantido debaixo da sombra do anel de ME, existe uma fonte de erro induzida pela porção anisotrópica da própria componente difusa da irradiância solar.

O fator de correção isotrópico para o anel de sombreamento de Melo-Escobedo é dado pela equação seguinte:

$$F_C = \left\{ 1 - \left(\frac{2b}{\pi R} \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi - \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_p} \cos(\theta_z) d\omega \right) \right\}^{-1} \quad (12)$$

A Equação (12) é o resultado da substituição da Equação (7) (fração de perda isotrópica) na Equação (3) que é a expressão geral para o fator de correção isotrópico. Resolvendo a integral resulta na Equação (13):

$$F_{C,ME} = \left\{ 1 - \left(\frac{2b}{\pi R} \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi - \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 (\cos(\phi)\cos(\delta)\text{sen}(\omega_p) + \omega_p\text{sen}(\phi)\text{sen}(\delta)) \right) \right\}^{-1} \quad (13)$$

No equipamento de ME, o anel é fixo e o detector pode se movimentar na direção norte-sul, sul-norte. O anel é inclinado da mesma forma que no anel de Drummond, porém diferentemente deste, em que o anel é que se move, no dispositivo de ME o que se move é o sensor. Como já explicado para o caso de Drummond o anel é posicionado de modo a ter o plano que o contém paralelo ao plano do equador terrestre, ou seja, com inclinação, em relação à vertical local, igual à latitude local voltado para o norte, para o caso de se estar no hemisfério sul, ou para o sul, no caso de se estar no hemisfério norte. O sensor pode se mover através de um mecanismo acionado por uma manivela que lhe permite ficar centralizado logo abaixo da sombra do anel. Esta mudança de posição é feita manualmente e a posição do sensor em relação à sombra é verificada visualmente. O único ajuste necessário para operar este dispositivo, após o posicionamento da banda de sombra, é o alinhamento do sensor na direção norte-sul abaixo da sombra projetada pelo anel.

Como já foi mencionado o raio do sol chega à superfície da Terra com uma inclinação δ em relação ao plano do equador terrestre, como mostram as Figuras 23 e 24.

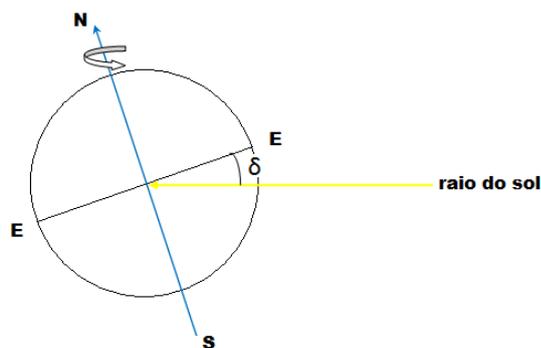


Figura 23 – Declinação Solar (δ) negativa

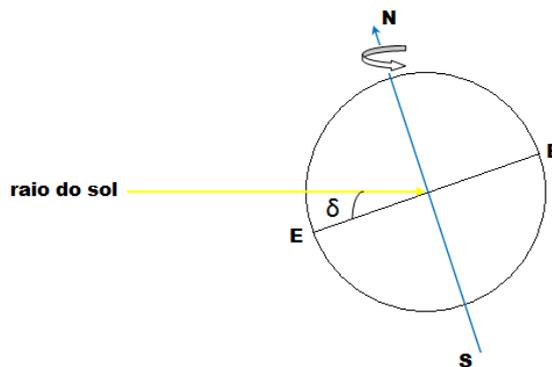


Figura 24 – Declinação Solar (δ) positiva

Fazendo-se uma análise qualitativa do movimento aparente do sol, o mesmo se desloca como mostrado na figura seguinte, com o passar dos meses do ano; os retângulos estreitos amarelos simulam o **movimento aparente** do sol na esfera celeste com o passar dos dias.

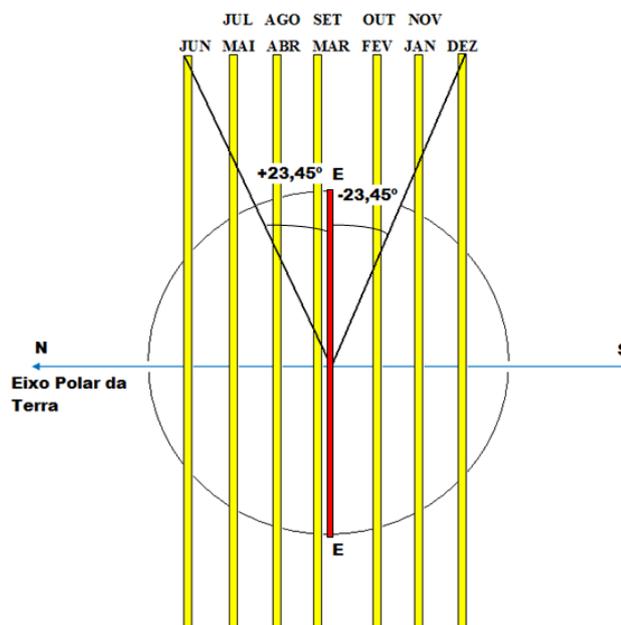


Figura 25 – Análise qualitativa do movimento aparente do sol

Utiliza-se agora o conceito de esfera celeste para representar uma esfera imaginária em que a Terra ocupa o seu centro e o sol posiciona-se em sua superfície (MELO, 1993). A direção dos raios solares descreve um movimento em torno do eixo polar da Terra na forma de um cone com centro no centro da Terra, tendo por base a circunferência que o sol descreve na esfera celeste. Desta maneira os raios solares descrevem, ao longo de um dia, um movimento cônico com relação ao eixo polar.

Então para que a irradiância direta do sol seja bloqueada por um anel de sombreamento, durante um dia inteiro, seguindo a filosofia do dispositivo de ME, estando o aparelho sobre a linha do equador, dever-se-ia colocar o plano que contém a banda de sombra paralelo ao plano do equador, de acordo com a Figura 26.

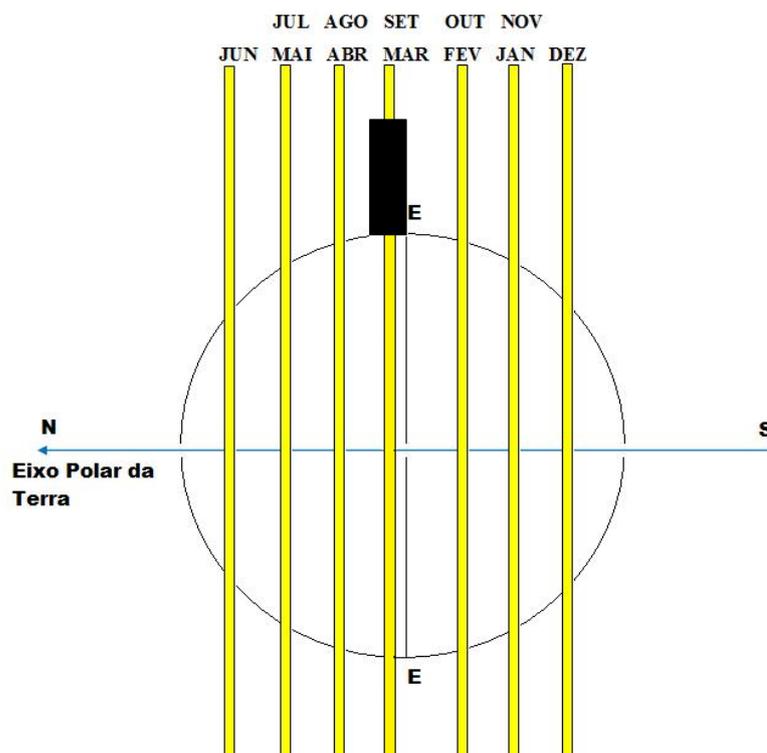


Figura 26 – Posicionamento do Anel de ME sobre a linha do equador

Como a declinação solar é específica para cada dia do ano, para que o anel de Melo-Escobedo bloqueie a incidência da irradiância direta com o passar dos dias é necessário, além do posicionamento correto da banda de sombra, que a plataforma móvel, sobre a qual se encontra o piranômetro, se desloque horizontalmente para o norte ou para o sul, a depender da época do ano, de acordo com a Figura 27-a,b,c,d,e,f,g.

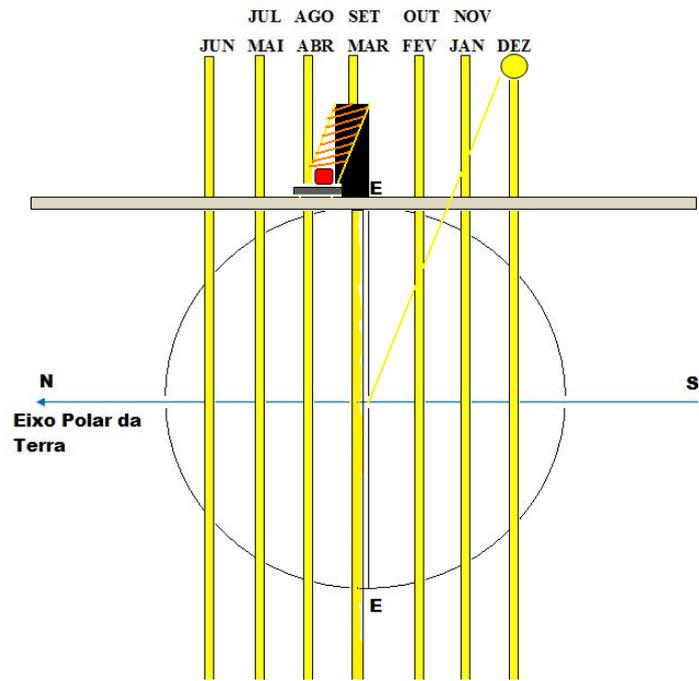


Figura 27 a

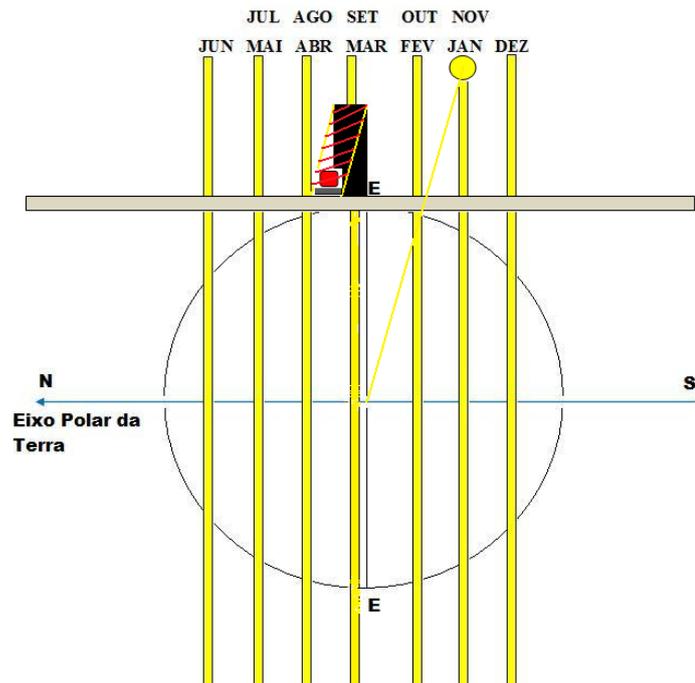


Figura 27 b

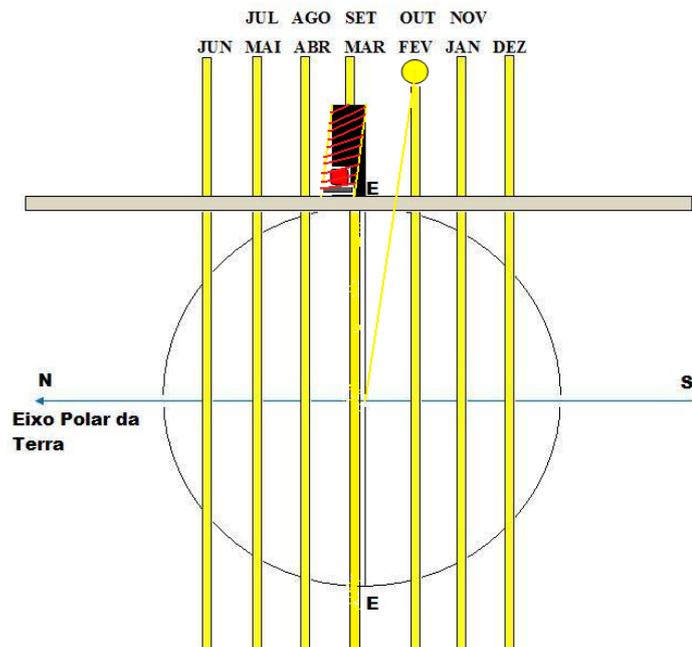


Figura 27 c

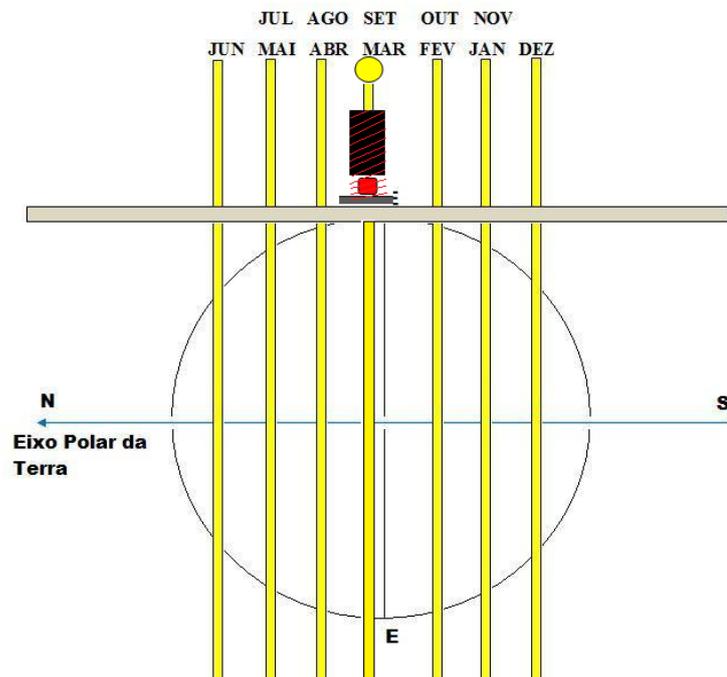


Figura 27 d

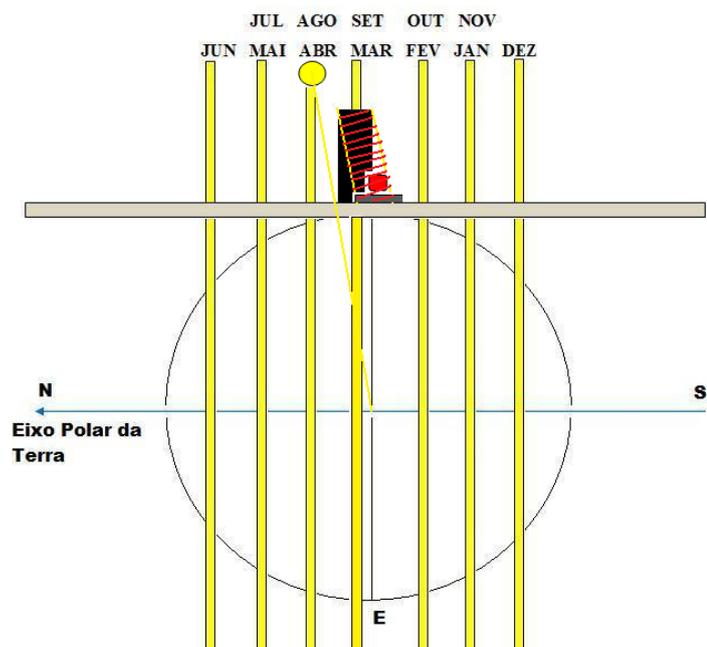


Figura 27 e

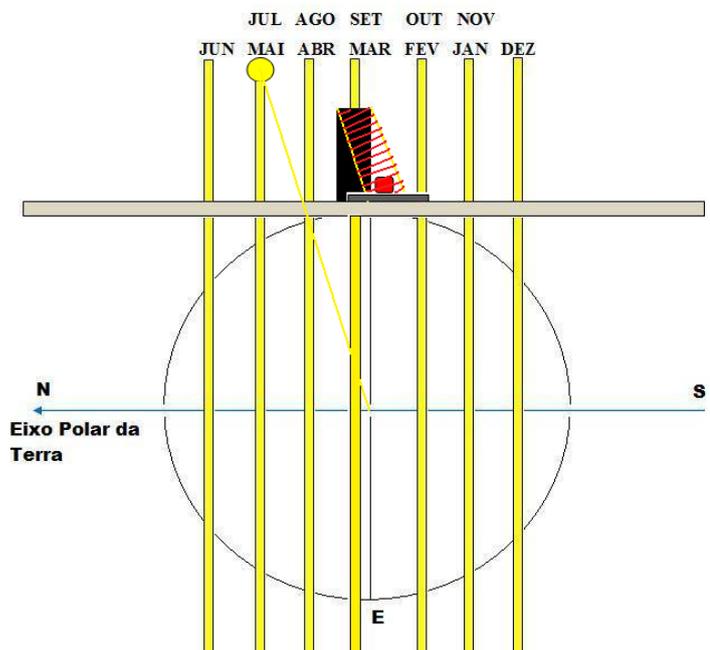


Figura 27 f

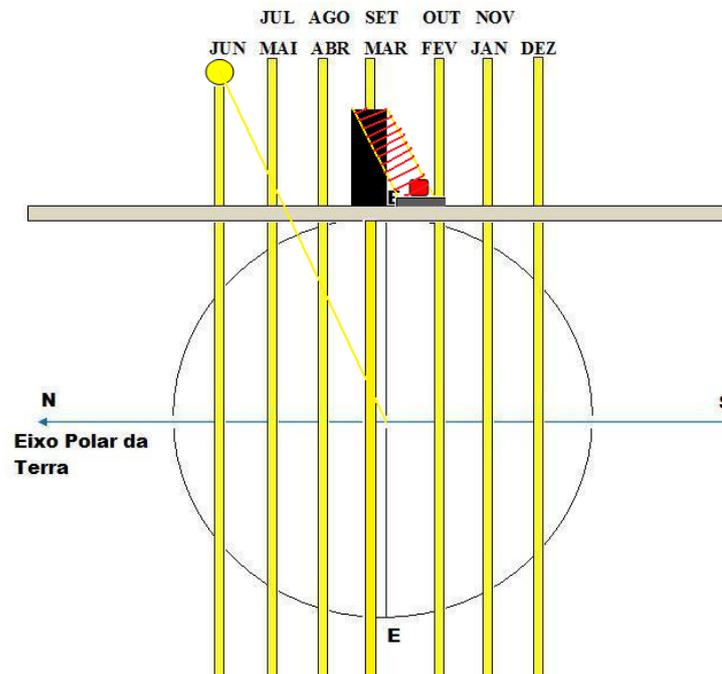


Figura 27 g

Figura 27 – (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) Descrição do movimento do piranômetro no anel de ME ao longo de um ano

Pode-se perceber através das figuras que à medida que o sol se desloca para o norte o sensor desloca-se para o sul e quando o sol se desloca para o sul o sensor irá para o norte, rastreando a sombra do anel que permanece fixo. Operando deste modo, o dispositivo consegue bloquear a incidência da irradiância direta do sol durante todo o ano, mantendo desta forma o sensor (piranômetro) “protegido” da incidência direta da irradiância solar.

De fato o anel de sombreamento no dispositivo de ME permanece fixo, mas a sua inclinação com relação à vertical local pode mudar a depender da latitude em que se encontra o dispositivo. A explicação anterior foi baseada estando o aparelho em qualquer ponto da linha do equador. O anel de sombreamento de ME pode ser aplicado em latitudes até 30° norte ou sul, pois para latitudes maiores que 30° o comportamento do fator de correção (F_C) isotrópico para o anel de sombreamento de ME diverge consideravelmente dos outros dispositivos: Drummond (1956) e Robinson e Stoch (1964); e sua aplicação não é recomendada (Oliveira *et al.*, 2002). Então, para o caso geral, em que o anel de ME é aplicado em latitudes diferentes da latitude do equador o mesmo deve ser deslocado da vertical local em direção ao plano do equador de um ângulo igual ao negativo da latitude local, isto é, estando no hemisfério norte se inclinará o anel para o sul e estando no hemisfério sul, para o norte. Pois para que haja o bloqueio da irradiância direta do sol durante um dia

inteiro, o plano que contém o anel precisa estar paralelo ao plano do equador (ou perpendicular ao eixo polar) e, portanto paralelo ao arco de circunferência descrita pelo sol durante seu movimento de nascer e se pôr, assim como nota-se na Figura 28.

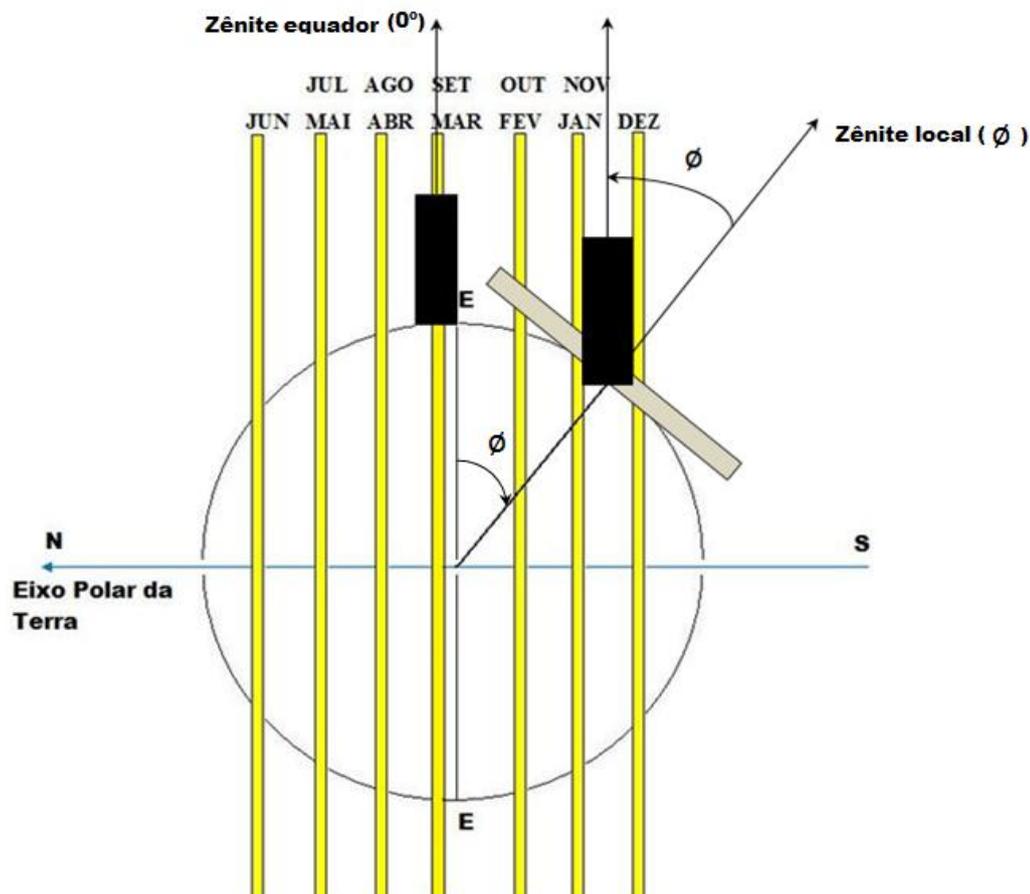


Figura 28 – Alinhamento da banda de sombra para latitude diferente de 0°

Na Figura 29 tem-se um esquema simplificado do anel de ME,

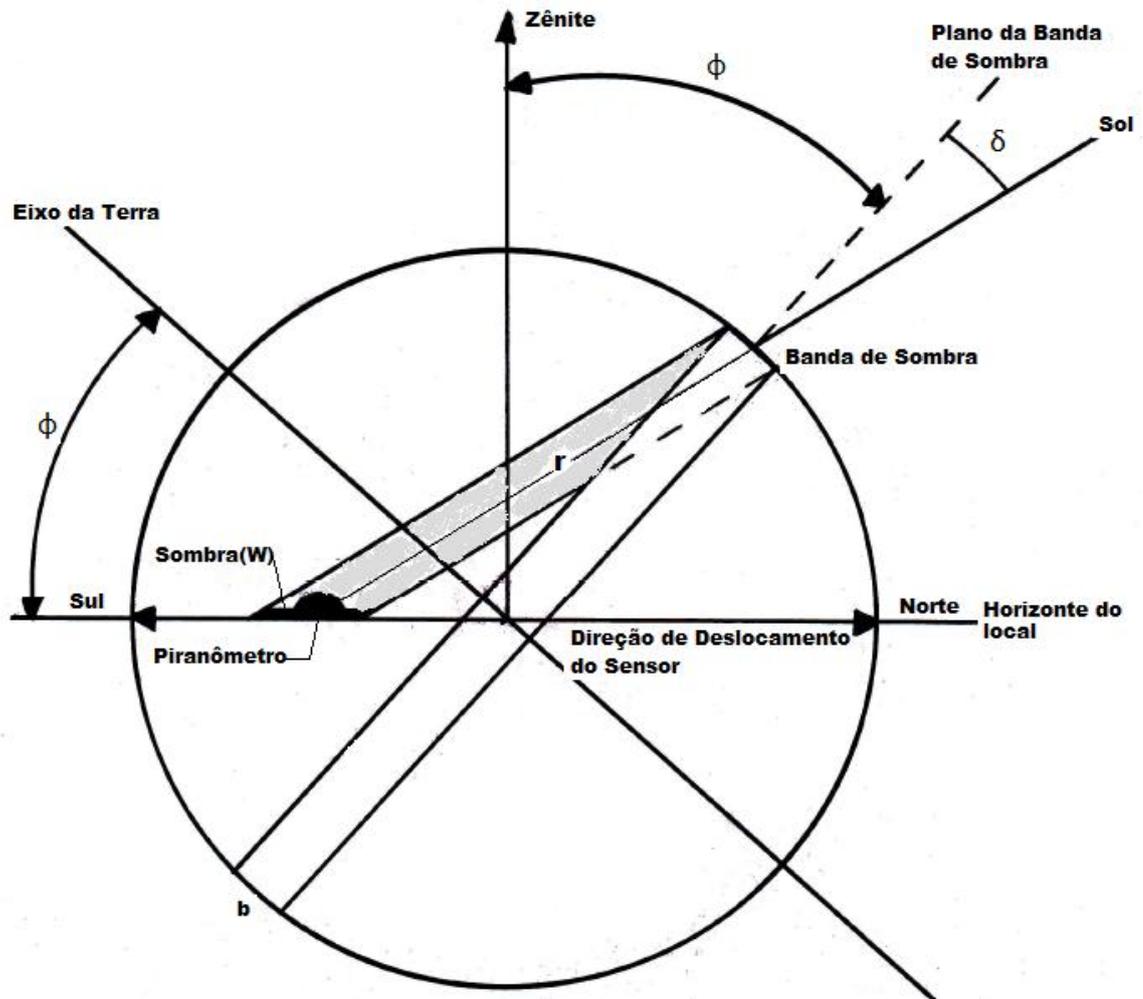


Figura 29 – Esquema do dispositivo de Melo-Escobedo

O raio da esfera que intercepta a extremidade do anel e é centrada no sensor é igual a distância “r” e varia de acordo com a equação seguinte:

$$r = \frac{R}{\cos(\delta)} \left[\frac{\cos(\phi)\cos(\delta)}{\cos(\phi - \delta)} \right] \quad (14)$$

Sendo a declinação solar (δ) calculada a partir da seguinte equação:

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (15)$$

Com n= dia Juliano.

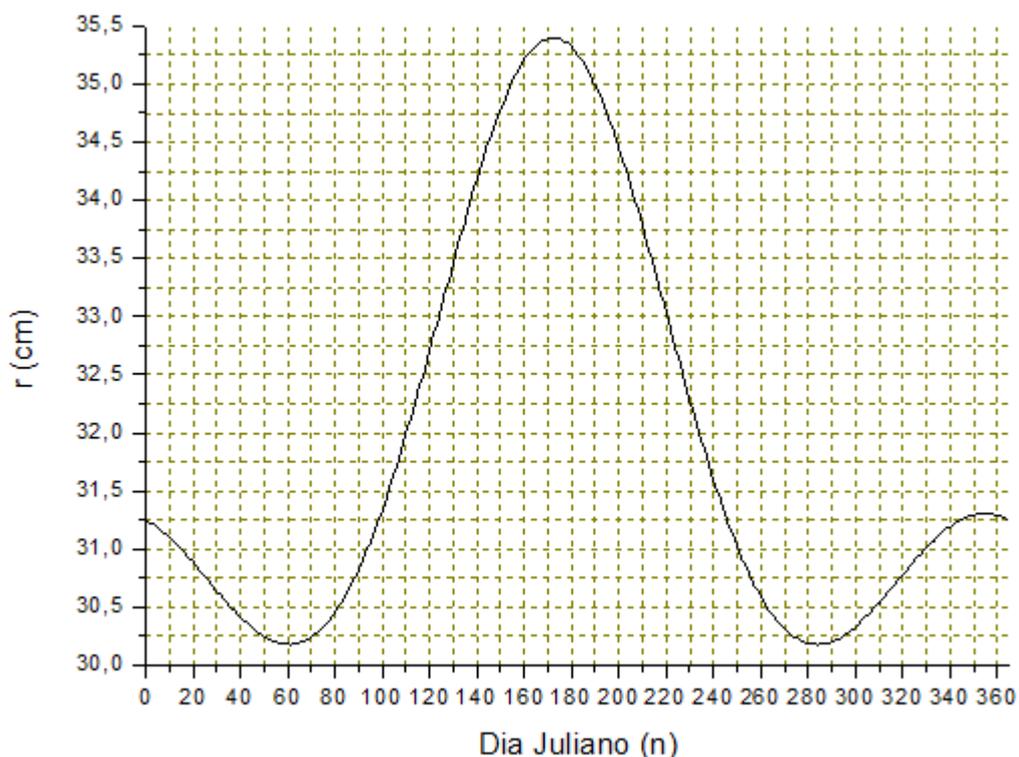


Figura 30 - Gráfico demonstrativo da variação da distância anel-piranômetro para um anel de ME de raio 30,5 cm em Recife (latitude $-8,05^\circ$)

O gráfico da Figura 30 mostra que em um anel de sombreamento de ME em dias próximos aos equinócios, 21 de março e 21 de setembro, têm-se os valores mínimos da distância anel-detector. No solstício de inverno dia Juliano 172 (hemisfério sul) há a máxima variação de r.

A largura da sombra formada sobre o detector é a mesma equação da largura da sombra para o dispositivo de Drummond dada pela Equação (11) cujo gráfico está explicitado na Figura 31.

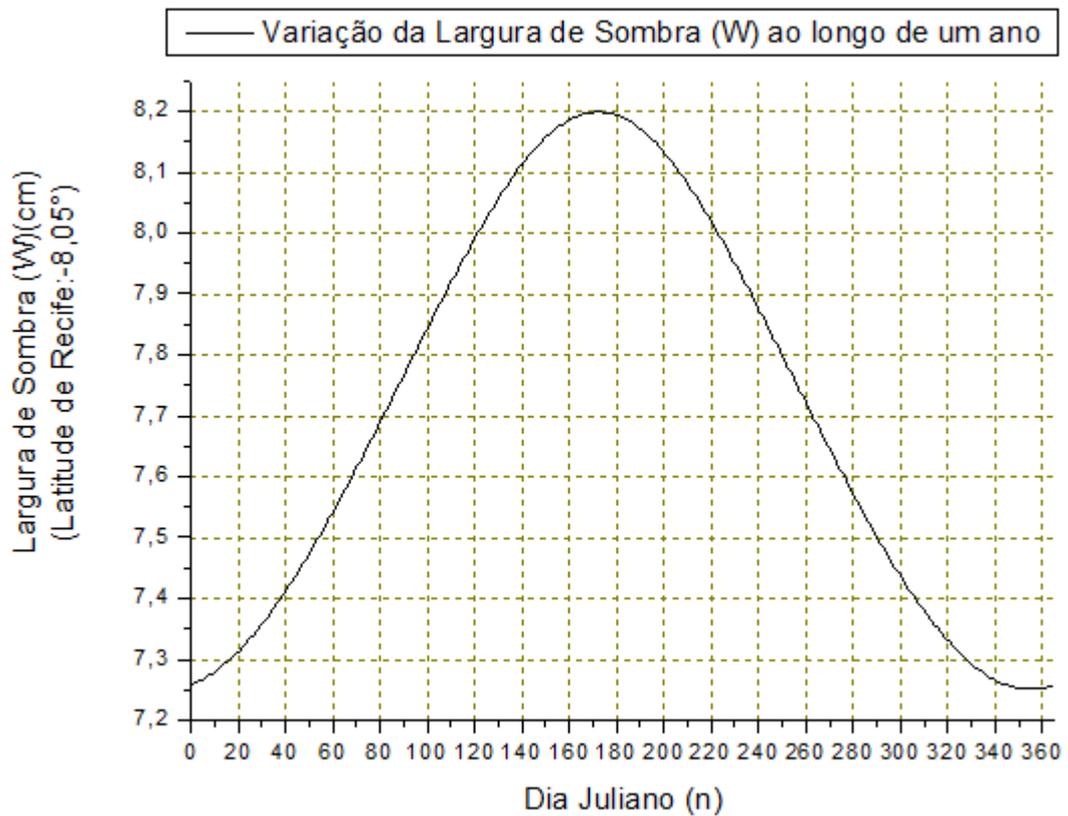


Figura 31 – Variação da largura de sombra W para um anel de 3 polegadas

Este último gráfico mostra que a largura da sombra projetada no dia Juliano 172 (21 de junho) é máxima contra uma largura mínima no dia Juliano 355 (21 de dezembro) para um anel de sombreamento posicionado em Recife (latitude $-8,05^\circ$) e com 3 polegadas (7,6 cm) de largura. A sombra tem a mesma largura do anel em torno dos dias 70 (10 de março) e 275 (1 de outubro), dias em que o sol está com uma declinação solar (δ) igual a latitude local (ϕ), no caso $-8,05^\circ$. Nesses dias o sol passa, ao meio-dia solar, pelo zênite local.

3.8 Comparação entre os anéis de sombreamento de Drummond e Melo-Escobedo

A Figura 32 expressa bem a semelhança entre o anel de sombreamento de Drummond e o anel de sombreamento de Melo-Escobedo. Em ambos a inclinação do anel é a mesma, porém enquanto no Drummond o sensor é fixo e o anel se movimenta numa direção paralela ao eixo polar da Terra, isto é, sobre o segmento de reta CD no anel de Melo-Escobedo o anel é fixo e o sensor é que se movimenta ao longo do segmento de reta AB.

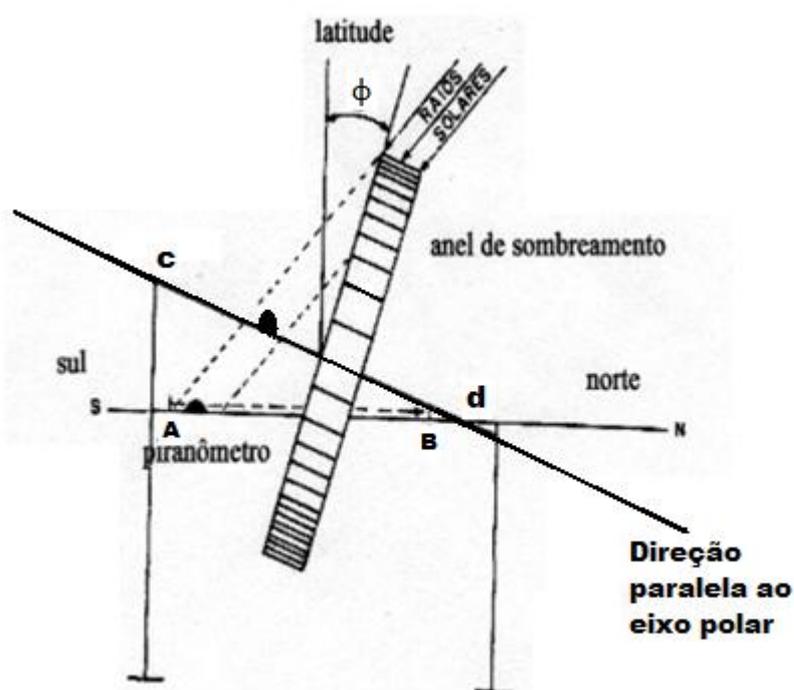


Figura 32 – Comparação entre os anéis de ME e Drummond

O método do anel de sombreamento tem como desvantagem o uso de fatores de correção para compensar a parcela da irradiância difusa barrada pelo anel de sombreamento (DRUMMOND, 1956 apud DAL PAI; ESCOBEDO, 2005). Para os anéis de Drummond e ME, a fração de perda F_p é baseada na isotropia da radiação, e leva em consideração apenas o uso de fatores geométricos (raio e largura do anel) e geográficos (latitude e declinação solar). Diversos pesquisadores têm mostrado que a aplicação da correção isotrópica não contempla efeitos atmosféricos (turbidez, nebulosidade, poluição, vapor d'água) que são responsáveis pela anisotropia na radiação difusa (DAL PAI; ESCOBEDO, 2005).

Em pesquisa realizada por Dal Pai e Escobedo (2005) foram analisados três anéis de sombreamento para medir a irradiância difusa, sendo dois do tipo ME e um Drummond. O

ME1 com as seguintes características: largura 0,10 m e raio 0,40 m com piranômetro Eppley-PSP ($K = 8,17 \text{ m V/Wm}^{-2}$); o ME2 com largura 0,05 m e raio 0,20 m e piranômetro Kipp-Zonen ($K = 11,99 \text{ m V/Wm}^{-2}$) e o Drummond com largura 0,05 m e raio 0,20 m e piranômetro Kipp-Zonen ($K = 9,93 \text{ m V/Wm}^{-2}$). A irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento Drummond foi corrigida a partir da aplicação do fator isotrópico diário através das Equações (3) e (5) e a irradiância difusa pelos anéis ME através das Equações (3) e (7) propostas por Oliveira et al. (2002 apud DAL PAI;ESCOBEDO,2005). A irradiância difusa de referência foi calculada pelo método da diferença, com o uso de um pireliômetro associado a um piranômetro, entre as irradiações, global e direta projetada na horizontal (DAL PAI; ESCOBEDO, 2005).

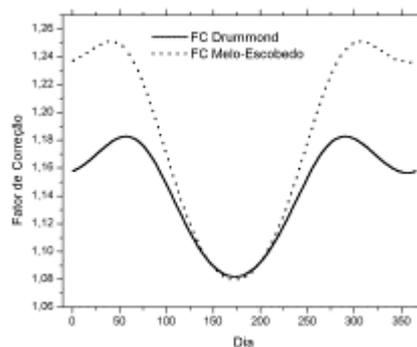


Figura 33 – Gráfico demonstrativo da variação do Fator de Correção (F_C) isotrópico ao longo de um ano para as montagens de Drummond e ME para a latitude de Botucatu ($-22,85^\circ$), São Paulo. Adaptado de Dal Pai; Escobedo (2005)

A aplicação das correções isotrópicas para os métodos de medida de Drummond e ME no ato da medida indica a igualdade nos níveis de irradiância difusa para uma situação atmosférica isotrópica, sendo que qualquer possível diferença nesses níveis quantitativos é devido ao efeito anisotrópico da atmosfera local. Com o objetivo de verificar se o efeito da anisotropia era similar para os anéis ME 1, ME 2 e Drummond, calculou-se e comparou-se os fatores de correção anisotrópicos para a irradiância difusa medida pelos 3 anéis. Os fatores de correção anisotrópicos para os anéis ME 1, ME 2 e Drummond para os anos de 2000 e 2001 em que os três arcos estiveram medindo a irradiância difusa simultaneamente foram de 19%, 13% e 10,5% respectivamente. A comparação entre os fatores de correção entre os dois arcos ME mostra que a vantagem operacional de se ter uma largura maior e que representa uma maior tolerância no ajuste do arco diariamente não representa uma vantagem na qualidade da

medida. O arco de menor largura exige correção diária, contrário ao arco de maior largura, que tem tolerância para 2 dias. Segundo Sirén (1987 apud DAL PAI; ESCOBEDO,2005), a correção anisotrópica é tanto maior quanto maior for a razão largura-raio do anel de sombreamento. Os arcos ME 1 e ME 2 possuem a mesma razão largura/raio, porém o efeito da anisotropia é diferenciado para cada arco. Quanto maior for a sombra (largura) do arco, mais irradiância circunsolar é interceptada pelo mesmo, representando maior obstrução do efeito da anisotropia e portanto resultando num fator de correção anisotrópico maior. Os resultados obtidos para os arcos ME 2 e Drummond são justificados pela diferença entre as duas montagens, cuja distância entre o sensor e o arco são diferentes, a menos dos dias 24/05, dia Juliano 144 e 17/07, dia Juliano 198 (Figura 33) , onde os dois fatores de correção isotrópicos são iguais. O princípio operacional do arco ME estabelece uma distância sensor-anel maior que o arco de Drummond, representando um fator de correção anisotrópico maior. A comparação entre os arcos ME 1, ME 2 mostrou que a correção anisotrópica é diretamente proporcional à largura, ou seja, maior largura do anel representa maior correção anisotrópica. Para os arcos de Drummond e ME 2 , a diferença entre os níveis radiativos é devida às diferentes montagens e a correção anisotrópica aumenta à medida que se aumenta a distância sensor-anel (DAL PAI; ESCOBEDO, 2005).

Diante do exposto, qualquer possível diferença entre as medições da irradiância difusa de Drummond e Melo-Escobedo, após a aplicação dos respectivos fatores de correção isotrópicos, é devida ao efeito anisotrópico da atmosfera local. E essa diferença é devida às diferentes montagens dos equipamentos, sendo a correção anisotrópica do ME ligeiramente maior. Portanto, como os equipamentos são comparáveis a escolha pela automatização do anel de sombreamento de Melo-Escobedo deveu-se a simplicidade em se construir e controlar uma base horizontal móvel.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho trata da automação do anel de sombreamento de Melo-Escobedo tendo o intuito de aumentar a logística do processo dispensando o requisito manual de ajuste diário por um operador. Este procedimento faz parte da linha de pesquisa “avaliação e mapeamento do recurso solar” do Grupo FAE (Fontes Alternativas de Energia) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Campus de Recife.

4.1 Projeto conceitual do anel de sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA)

A automação do anel de ME baseou-se na estrutura mecânica de um sistema manual trazido da Universidade Federal de Alagoas – UFAL idêntica aos anéis de sombreamento de ME do Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônomicas do Campus de Botucatu- UNESP. O diferencial deste trabalho basicamente foi a troca da manivela por um motor DC (motor de corrente contínua), acionado por um sistema de controle eletrônico de malha fechada baseado em dois fotosensores que reconhecem a presença de luz ou ausência dela (sombra). Estes fotosensores, posicionados sobre uma plataforma móvel, enviam um comando para um controle central que aciona ou não o motor DC com o objetivo de posicionar essa base móvel embaixo da sombra do anel. Na base móvel se encontra o piranômetro que irá medir, por estar sombreado, a irradiância difusa.

A princípio o sensor, baseado nos fotosensores, que foi construído para detectar a presença da sombra, foi calibrado para interpretar como iluminado uma irradiância igual ou superior a 450 W/m^2 . Portanto, uma irradiância abaixo deste valor seria interpretada como sombra. A idéia fundamental para o bom funcionamento do Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA) foi estabelecer uma irradiância mínima superior a 450 W/m^2 para que o mesmo funcione corretamente. Pois caso contrário, no momento em que a base móvel estivesse “à procura” (no estado de busca) da sombra do anel e nesse instante houvesse uma irradiância abaixo de 450 W/m^2 , por exemplo, com a passagem de uma nuvem, a base

móvel interromperia seu movimento, desligando o motor DC, antes de encontrar a sombra do anel. Para resolver tal problema foi desenvolvido um programa, instalado em um “datalogger” (sistema de aquisição de dados) que faz um “questionamento” ao piranômetro que mede a irradiância global (conectado ao “datalogger”) se a irradiância está igual ou acima de 800 W/m² (condição livre de nuvens). Se essa condição for satisfeita o programa habilita a máquina. Isto é, a mesma só entra no modo “ligado” se, e somente se, a irradiância estiver igual ou acima daquele valor. Garantindo que o sensor só encontrará sombra abaixo do anel. Uma vez habilitada e estando no modo de busca o motor DC é acionado. Se a irradiância cair abaixo de 800 W/m² a máquina é desligada, porém o estado de busca é mantido. Assim que a irradiância voltar a atingir o valor estabelecido a máquina é novamente ligada. Como ainda está no modo busca o motor DC volta a ser acionado. O estado de busca só é desativado caso o sensor encontre a sombra do anel.

O projeto conceitual de todo o sistema MEA está descrito na Figura 34. Na figura pode-se observar o desenho de um CLP-PIC. O CLPPIC é um Controlador Lógico Programável (CLP); um mini computador especializado baseado num microcontrolador que desempenha funções de controle através de softwares desenvolvidos pelo usuário, funções estas de diversos tipos e níveis de complexidade. É um equipamento eletrônico digital com hardware e software que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

No CLPPIC está embarcado um software, escrito na linguagem C, desenvolvido para controlar o acionamento de um motor DC de modo a posicionar a plataforma móvel abaixo da sombra do anel. Este controle está baseado em cinco entradas digitais oriundas de dois fotosensores (LDR) especificados na Figura 34 como FS_Norte (Entrada Digital 1 ou E.DIG1) e FS_Sul (E.DIG2), das duas chaves de fim de curso (FC_Norte (E.DIG3) e FC_Sul (E.DIG4)) e de um sinal originado no “Datalogger” denominado de Rad_Ok (E.DIG5) que indica se a irradiância solar está igual ou acima de 800 W/m². O sinal proveniente dos fotosensores indicando luminosidade ou sombra precisa ser interpretado. Para tal foi desenvolvido um sensor, um controle externo em que o sinal proveniente dos fotosensores sai tratado para o CLPPIC identificando se a base móvel encontra-se ou não abaixo da sombra do anel servindo assim de controle da posição da mesma. O sinal analógico proveniente dos dois piranômetros, o piranômetro que mede a irradiância Global e o piranômetro que mede a

irradiância Difusa, seguem para duas entradas analógicas existentes no “Datalogger”, podendo ser monitorado através do supervisor do Datalogger, o Loggernet, instalado em um computador. O “Datalogger” é programado para efetuar a leitura de valores da irradiância solar global e difusa a cada segundo armazenando a média de 60 leituras em 60 segundos, ou seja, armazenando um valor médio a cada minuto. . São três as saídas do CLPPIC, a saber: a saída do Relé1 (S.Relé1), a saída do Relé2 (S.Relé2) e a saída do Relé3 (S.Relé3). A saída S.Relé1 e a saída S.Relé3 estão em contato direto com os terminais do motor DC controlando o mesmo a partir das “decisões” do CLPPIC. Estas “decisões” do CLPPIC estão baseadas em três modos de trabalho do sistema como um todo: o modo de inicialização (Modo_I), o modo de busca da sombra do anel (Modo_B) e o modo de rastreamento (Modo_R) desta, melhor descritos na Seção 4.3.1. O motor DC, por sua vez, é alimentado por uma bateria de 12 Volts que é carregada por um painel fotovoltaico. O CLPPIC é alimentado por uma fonte DC de 12 Volts ligada a rede elétrica. Por fim, pode ser visto na Figura 34 que toda a estrutura do Anel de Melo-Escobedo automatizado (MEA) é orientada na direção norte-sul geográfico.

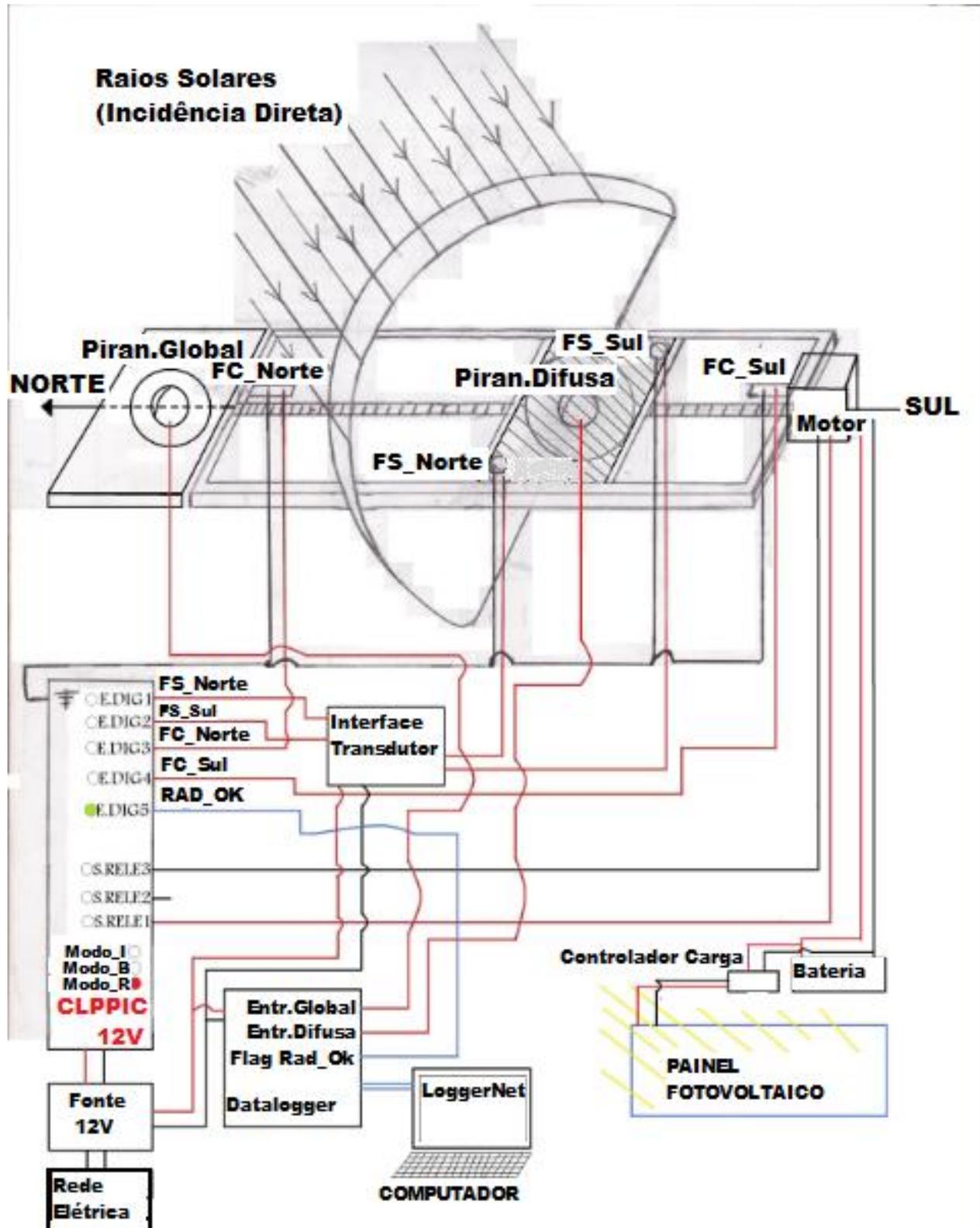


Figura 34 – Projeto conceitual de todo o sistema MEA

O desenho mecânico do protótipo do anel de Melo-Escobedo Automatizado (MEA) está na Figura 35.

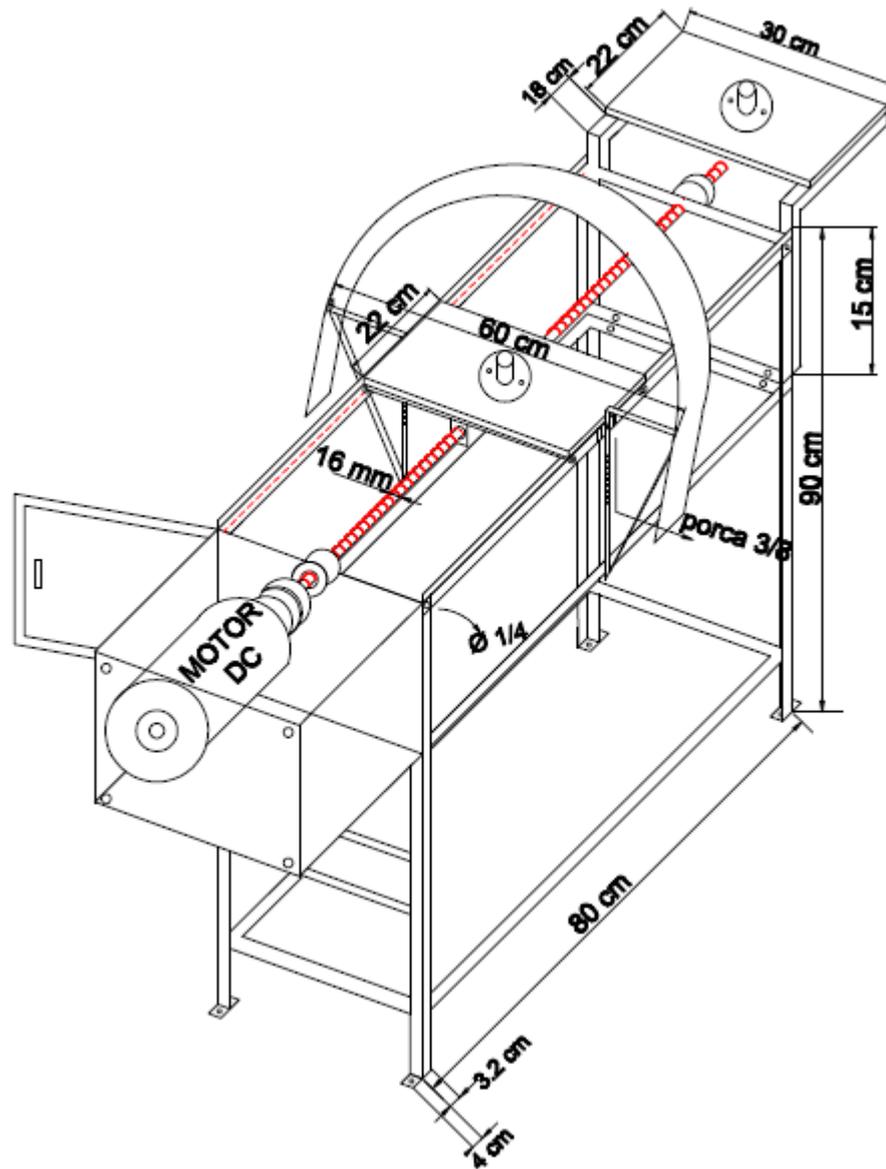


Figura 35 – Desenho mecânico do protótipo do MEA

4.1.1 Projeto da largura do anel de sombreamento do MEA

A princípio seria utilizado um piranômetro PSP para ser sombreado pelo anel. Esse piranômetro possui uma cúpula de vidro que encerra o sensor. O diâmetro dessa cúpula de vidro é de aproximadamente 5,1 cm. Portanto, a largura do anel de sombreamento deveria ser

tal que a sua mínima largura de sombra W , determinada pela Equação 11, seja ainda maior que 5,1 cm de modo que a sombra encubra todo o sensor em qualquer época do ano. O anel de Drummond cujas medidas serão comparadas com as medidas do MEA (procedimento descrito na metodologia) possui 5,5 cm de largura que é aproximadamente 2,17 polegadas. Portanto para que fosse possível uma comparação correta entre os dois instrumentos seria necessário que o anel do MEA também tivesse a mesma largura, porém comercialmente só foram encontradas barras de alumínio de 2 (5,08 cm) ou de 3 (7,62 cm) polegadas de largura. Mas, a barra de 2 polegadas não atenderia a necessidade de encobrir o PSP já que a mínima largura de sombra para esta largura seria em torno de 4,85 cm, de acordo com a Figura 36. Assim foi escolhido a banda de sombra para o MEA de 3 polegadas com o gráfico da variação de sua sombra descrito na Figura 31.

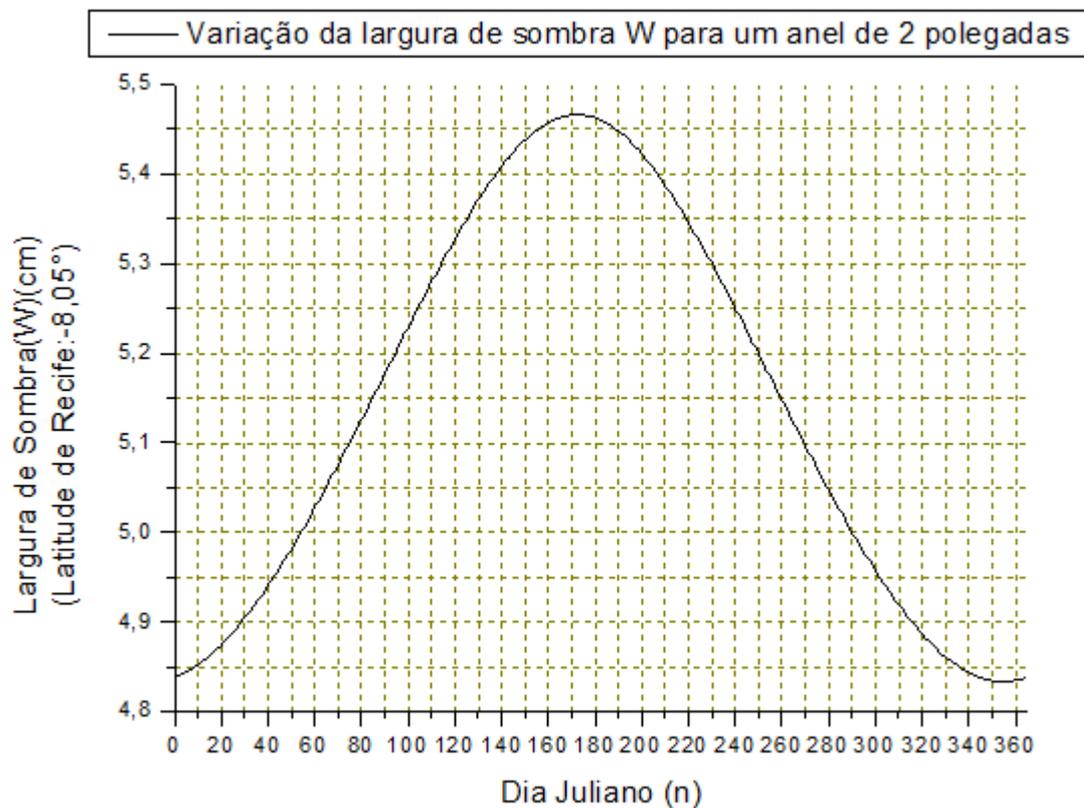


Figura 36 – Variação da largura de sombra W para um anel de 2 polegadas

4.2 Projeto mecânico e construção da estrutura do Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA)

A primeira parte a ser construída foi a estrutura básica de sustentação, Figura 37 (a). Toda a estrutura foi feita em ferro, com cantoneira 1' ¼ com dimensões: 90 cm de altura, 80 cm de comprimento e 30 cm de largura. A estrutura foi executada com o intuito de permitir desacoplar a parte superior (de 15 cm de altura), para possibilitar o trabalho em uma bancada para ajustes do equipamento, caso necessário. Nota-se também, em destaque, na Figura 37 (b) que na metade superior da estrutura há o local onde será instalado o anel de sombreamento. O parafuso sem fim é de aço inoxidável de 16 mm de bitola. O mesmo está sendo sustentado por dois mancais em suas extremidades e acoplado a estes mancais há rolamentos para diminuir a resistência ao giro. A etapa seguinte foi a construção da caixa de sustentação e proteção do motor DC, como pode ser visto na Figura 38.

A função básica desta caixa é a sustentação do motor DC na estrutura física do anel de Melo-Escobedo Automatizado (MEA), mas também serve para proteção contra as intempéries, pois como será visto adiante ela será coberta com paredes de alumínio. Dois pontos fundamentais da construção desta estrutura do MEA foram ligar o eixo do motor DC, visto em detalhes na Figura 39, ao parafuso-sem-fim e fixar o motor à estrutura.



Figura 37 – (a) e (b) Estrutura básica do anel de Melo-Escobedo Automatizado (MEA)

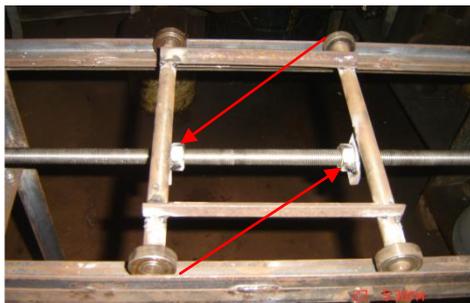


Figura 38 – Construção da caixa de sustentação e proteção do motor DC



Figura 39 – Motor DC BOSCH de 12 V/50W /35-50 rpm

Uma peça foi criada para conectar os três parafusos do motor e a base desta peça foi fixada à estrutura da máquina. Um detalhe importante de ser mencionado foi a colocação de buchas de plástico entre os parafusos do motor e a carenagem evitando assim acúmulo de carga eletrostática na estrutura mecânica, o que poderia afetar o funcionamento do CLPPIC. A fase seguinte foi a fixação dos eixos da base móvel ao parafuso sem fim para viabilizar o deslocamento do piranômetro ao longo da linha norte-sul e manter-se dentro da faixa sombreada. A solução já desenvolvida por Melo- Escobedo (MELO, 1993; ESCOBEDO *et al.* 1997) e também aplicada aqui foi soldar porcas, já rosqueadas ao parafuso sem fim, aos eixos da base horizontal móvel de modo que ao girar o parafuso tem-se o deslocamento da mesma (Figura 40).



Figuras 40 – Porcas soldadas aos eixos da base móvel

Foi feita uma estrutura para sustentar o piranômetro que mede a irradiância solar global horizontal como pode ser visto na Figura 41. As bases horizontais, móvel e fixa, foram instaladas de modo a que ficassem na mesma altura para que os piranômetros possam medir em iguais condições.



Figura 41 – Estrutura de sustentação da base horizontal fixa

Foi feita a furação das bases para que fosse possível fixar até três tipos de piranômetros de diferentes tamanhos e marcas de acordo com a Figura 42. Por fim, foi construído e fixado o arco de anel de sombreamento feito de alumínio com três polegadas de largura e raio igual a 30 cm como pode ser visto na Figura 43. Foi escolhido o arco de anel ao invés do anel propriamente dito por ser de mais fácil construção e por ser o arco de anel também utilizado em anéis de sombreamento comerciais.



Figura 42 – Furação das bases horizontais para comportar um piranômetro



Figura 43 – Fixação do arco de anel de sombreamento do MEA e Gnomon

A fixação do arco de anel foi feita usando-se dois apoios tipo mão-francesa associadas a parafusos providos de porcas do tipo borboleta para facilitar o posicionamento do mesmo. Na Figura 43 nota-se também a presença do Gnomon, destacado pela seta amarela, usado para traçar o norte geográfico ou norte verdadeiro. Terminada a etapa da construção mecânica do MEA, foi feita a sua galvanização para aumentar sua vida útil uma vez que o equipamento ficará exposto às intempéries ininterruptamente; o resultado final pode ser visto na Figura 44 com todo equipamento mecânico já montado, e com seu eixo principal alinhado com a direção norte-sul geográfica, na Área de Testes do Grupo FAE. Na seqüência o arco de anel foi pintado na cor preto fosco para diminuir reflexões devido ao albedo.



Figura 44 – Estrutura mecânica do MEA galvanizada

4.3 Projeto eletrônico do Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA)

Depois de concluída a construção da estrutura mecânica o sistema MEA foi montado, incluindo os sensores, o controle eletrônico e um sistema de suprimento de eletricidade FV autônomo. De forma resumida o sistema MEA é constituído por:

- Dois piranômetros de mesmo modelo da marca LI-COR:
 - SR. NO. PY46727 (Sombreado (Difusa));
 - SR.NO. PY46730 (Global);



Figura 45 – Piranômetro LI-COR

- Uma plataforma de ferro com base horizontal móvel guiada por um parafuso sem fim de aço inoxidável com 16mm de bitola;
- Dois fotosensores LDR (Light Dependent Resistor - Resistor Dependente de Luz); distanciados entre si de uma largura menor que a mínima largura da sombra do anel para a latitude de Recife;

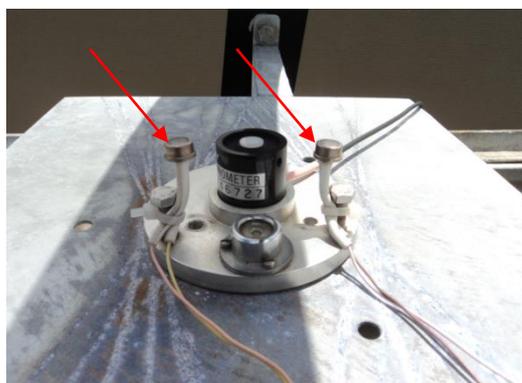


Figura 46 – Fotosensores LDR em destaque

- Duas chaves de fim-de-curso de 12 Volts da marca VABSCO; 10 A; ½ HP; 125/250VAC;

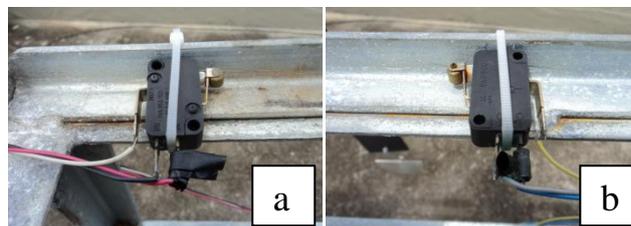


Figura 47 – (a) Chave fim-de-curso-norte; (b) Chave fim-de-curso-sul

- Um motor DC BOSH de 12 Volts/50 Watts/35-50 rpm; velocidade máxima: 50 +- 5 rpm, 1A(nominal); velocidade mínima: 35 +- 5 rpm, 0,7A(nominal); torque 10 Nm; classe de proteção:IP 33; redução 1:33; temperatura de superfície: menos que 50°C; peso aproximado: 1,3 kg, Figura 39. Optou-se por um motor DC pelo custo mais baixo que um motor de passo de mesma potência;
- Painel fotovoltaico de silício amorfo de 75 W_P; voltagem nominal: 12 V, modelo ENE750; ligado ao controlador de carga, este a bateria e a bateria ao motor DC;
- Um controlador de carga da marca MORNINGSTAR CORPORATION; tipo PROSTAR-30, 12/24 Volts; Solar: 30 A/Carga: 30 A;
- Uma bateria de 12 V/ 60Ah que alimenta o motor DC;



Figura 48 – Painel Fotovoltaico, controlador de carga e bateria

- Fusível de 3 A/ 250 V para garantir que caso haja alguma falha nas chaves-fim-de-curso, a base móvel não seja forçada contra a carenagem da estrutura metálica, pois com torque maior (maior resistência) a amperagem solicitada pelo motor aumentaria cortando o fusível e assim protegendo o sistema;

- Um controlador lógico programável (CLP-PIC) com cinco entradas digitais e três saídas a relé sendo usadas; programa desenvolvido na linguagem C, compilado para Assembly e instalado no PIC caracterizando um sistema embarcado;

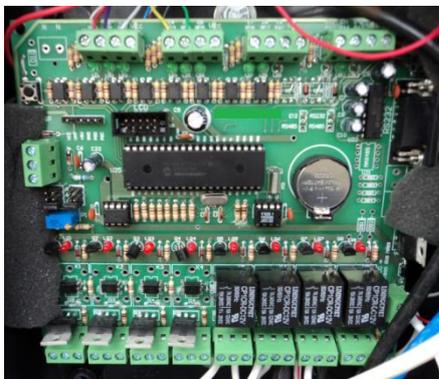


Figura 49 – Controlador Lógico Programável CLP-PIC

- Uma placa eletrônica de interface (sensor) entre o CLP-PIC e os fotosensores LDR;

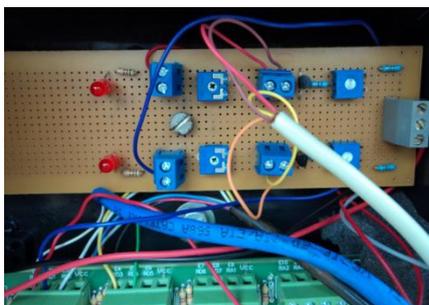


Figura 50 – Interface entre os LDR (fotosensores) e o CLP-PIC

- Uma fonte de alimentação de 12 Volts conectada a rede elétrica;
- Caixa plástica para proteger o sistema eletrônico da intempérie; protege as placas de circuito impresso CLP-PIC e Interface LDR/CLP-PIC, Figura 51;



Figura 51 – Caixa plástica de proteção

- Um Gnomon; haste de ferro de 30 cm de altura com bitola de 1 cm soldada perpendicularmente sobre uma plataforma de alumínio de 30x30 cm usada para a determinação do norte verdadeiro ou norte geográfico com o auxílio de um compasso;



Figura 52 – Gnomon e compasso

- Arco de anel de sombreamento de alumínio pintado na cor preto fosco com raio $R = 30$ cm e largura $b = 3''$ ou $b = 7,62$ cm;
- Transferidor de ângulo para que fosse possível o posicionamento correto do anel de sombreamento.



Figura 53– Transferidor de ângulo acoplado ao anel de sombreamento

- Um sistema de aquisição de dados “datalogger” da marca CAMPBELL SCIENTIFIC de especificação CR10X de 12 Volts;

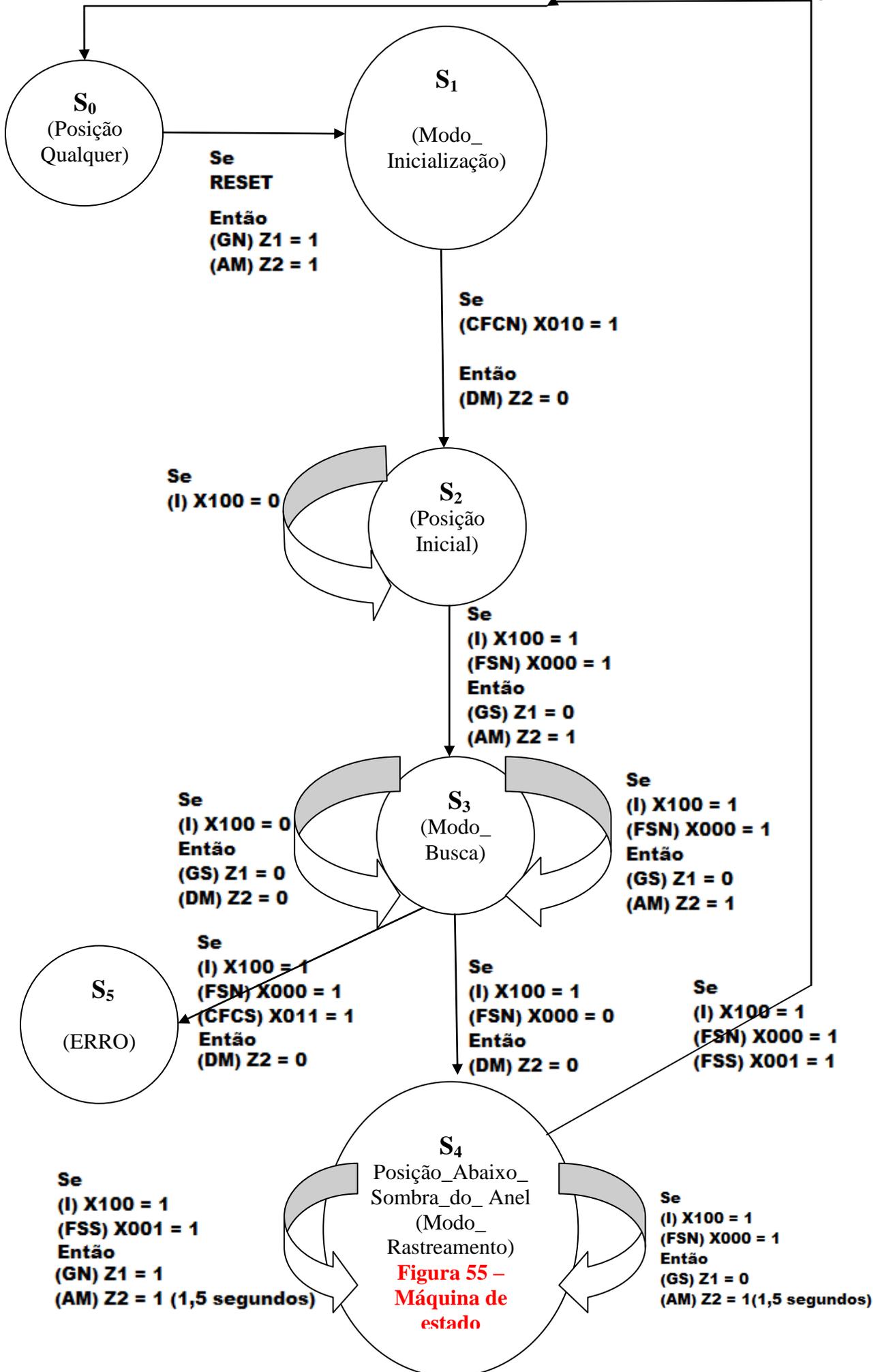


Figura 54 – Sistema de aquisição de dados (datalogger)

- Um computador usado para coletar os dados armazenados do “datalogger” através do supervisor que acompanha o sistema de aquisição de dados chamado LOGGNET.

4.3.1 Projeto do sistema de controle

Para o projeto eletrônico primeiramente foi desenvolvida a máquina de estado de todo o sistema, descrita na Figura 55.



ENTRADAS DO CLPPIC

1. Fotosensor_Norte (FSN): X_{000} ;
2. Fotosensor_Sul (FSS): X_{001} ;
3. Chave-Fim-de-Curso_Norte (CFCN): X_{010} ;
4. Chave-Fim-de-Curso_Sul (CFCS): X_{011} ;
5. Irradiância ou Rad_Ok (I): X_{100} ;
6. RESET.

SAÍDAS DO CLPPIC

1. Armar Giro para o Norte (GN): $Z_1 = 1$;
2. Armar Giro para o Sul (GS): $Z_1 = 0$;
3. Acionar_Motor (AM): $Z_2 = 1$;
4. Desligar_Motor (DM): $Z_2 = 0$.

ESTADOS

1. S_0 : Posição Qualquer;
2. S_1 : Modo_Inicialização;
3. S_2 : Posição Inicial;
4. S_3 : Modo_Busca;
5. S_4 : Posição Abaixo da Sombra do Anel (Modo_Rastreamento);
6. S_5 : Erro.

De acordo com a Figura 55, inicialmente a plataforma móvel está em uma posição qualquer, estado S_0 , sobre o eixo norte-sul geográfico (parafuso-sem-fim). Quando o botão de RESET é acionado a máquina entra no Modo_Inicialização (estado S_1) armando o sentido do movimento, no caso Giro_Para_Norte (GN) (o norte foi escolhido como referência) através do comando de saída $Z_1 = 1$ e logo em seguida aciona o motor DC pelo comando de saída $Z_2 = 1$ (AM). Quando a plataforma móvel atingir a Chave-Fim-de-Curso_Norte, a entrada CFCN será levada a 1, ou, $X_{010} = 1$ portanto um comando de saída para desligar o motor (DM) será acionado: $Z_2 = 0$. Entrando a máquina no estado S_2 (posição inicial).

A partir desse instante será verificado se a entrada X100, proveniente de um sinal vindo do “datalogger” que está recebendo os sinais de um piranômetro que mede a irradiância global, está no nível lógico 1 ou 0. Se estiver no nível lógico 0 significa que não há uma irradiância solar global maior ou igual a 800 W/m^2 e portanto, além do que já foi explicado na seção 4.1, não há distinção suficiente entre o que é sombra do anel e a região do entorno da sombra. Se estiver no nível lógico 1 significa irradiância solar igual ou acima de 800 W/m^2 , garantido uma região sombreada passível de ser detectada pelos fotosensores.

Então se a entrada $X100 = 0$ a plataforma móvel deve se manter na posição inicial, mas se $X100 = 1$ (Irradiância $\geq 800 \text{ W/m}^2$) será questionado pelo software instalado no CLPPIC se o Fotosensor_Norte (FSN) está ou não iluminado pelo sol. Se estiver $X000 = 1$ caso contrário $X000 = 0$ (abaixo da sombra do anel). Então estando a plataforma móvel na posição inicial (S2), se $X100 = 1$ e $X000 = 1$ um comando de saída mandando armar o sentido de giro para o sul (GS) será declarado fazendo $Z1 = 0$ e logo em seguida o motor será acionado ($Z2 = 1$). A partir desse instante a máquina entra no Modo_Busca (S3) sendo questionado se a irradiância(I) e o Fotosensor_Norte (FSN) estão no nível lógico 1 caso positivo, mantém-se o giro para o sul ($Z1 = 0$) e o motor acionado($Z2 = 1$). Caso uma nuvem passe encobrindo o sol no instante em que a plataforma móvel está se deslocando para o sul, $X100 = 0$, mantém-se a máquina armada para girar para sul, mas desliga-se o motor ($Z2 = 0$). Quando a nuvem sair da frente do sol e a irradiância estiver igual ou acima de 800 W/m^2 mais uma vez o sistema é acionado mantendo-se no modo de busca se deslocando para o sul até que a entrada do Fotosensor_Norte vá a zero, $X000 = 0$ significando que o fotosensor norte “encontrou” a borda norte da sombra do anel. Nesse mesmo instante um comando para desligar o motor é acionado, a plataforma pára com o piranômetro posicionado exatamente abaixo da sombra do anel e também com os dois fotosensores sombreados exatamente nas bordas da sombra. A máquina entra no Modo_Rastreamento, estado S4. Nesse estado, caso a irradiância $X100 = 1$ e o Fotosensor_Sul se iluminar $X001 = 1$ significa que o período seria de junho a dezembro em que o sol, em seu movimento aparente, se desloca para o sul e a sombra para o norte “descobrimo” o fotosensor sul; um comando de saída para armar a máquina para girar para o norte será acionado, $Z1 = 1$ (GN) e logo em seguida o motor será acionado por um intervalo de 1,5 segundos (pulso) deslocando a plataforma móvel para o norte em aproximadamente 2 mm fazendo a entrada X001 (FSS) voltar para o nível lógico 0. Situação análoga para o caso do fotosensor norte ficar iluminado $X000 = 1$ (estando a irradiância $X100 = 1$), a sombra estaria se deslocando para o sul (período de dezembro a junho). Portanto um pulso de 1,5 segundos

seria dado para o sul fazendo a entrada $X000 = 0$. Caso a entrada $X000$ não vá para zero quer dizer que o FSN ainda está sob a luz do sol, portanto mais um pulso será dado deslocando mais uma vez a base móvel para o sul; esse processo se repetirá até que o fotosensor norte seja encoberto pela sombra do anel.

Caso a máquina esteja no modo rastreamento e por algum motivo, estando a irradiância acima de 800 W/m^2 , os dois fotosensores FSN e FSS estejam iluminados, isto é, $X000 = 1$ e $X001 = 1$ o sistema voltará para o estado $S0$ se “auto-resetando”.

Há ainda o estado $S5$ (ERRO) que acontece caso a máquina estando no modo de busca (estado $S3$) tanto o Fotosensor_Norte quanto a Chave-Fim-de-Curso_Sul assumirem o nível lógico 1, $X000 = 1$ e $X011 = 1$, respectivamente. Significando que a plataforma móvel cruzou toda a extensão do seu percurso sem encontrar a sombra do anel; imediatamente ao tocar a CFCS o motor será desligado e o sinal de erro ativado.

4.3.2 Projeto eletrônico de acionamento do motor DC

As três saídas à relé do CLPPIC controlam além da ativação ou a desativação do motor DC, que está acoplado ao parafuso sem fim, o sentido de giro do mesmo. O parafuso sem fim está acoplado à base móvel onde se encontra o piranômetro que deve permanecer sombreado. Na Figura 56 tem-se os relés 1,2,3 e 4 que vêm na placa CLPPIC mas o relé 4 não está sendo utilizado.

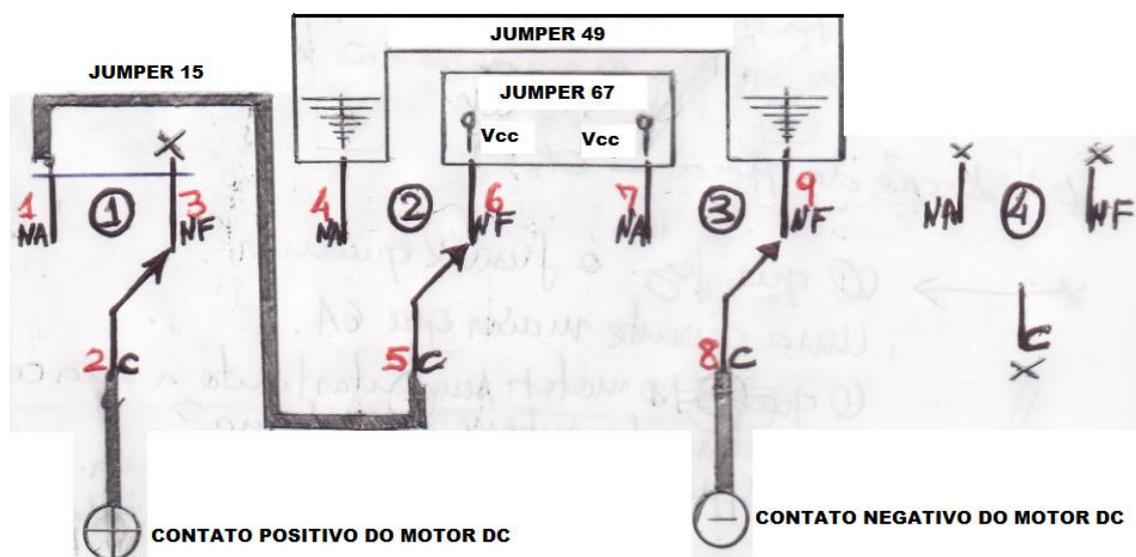


Figura 56– Esquema de ligação dos relés

Cada relé possui três terminais, a saber:

- Relé 1: terminais 1(normalmente aberto - NA),2(comum - C) e 3(normalmente fechado - NF);
- Relé 2: terminais 4(NA),5(C) e 6(NF);
- Relé 3: terminais 7(NA),8(C) e 9(NF).

Os terminais do motor DC já estão ligados aos terminais dos relés. O contato positivo do motor está soldado ao terminal 2 (Comum), do relé 1, que está desconectado. E o contato negativo do motor está soldado ao terminal 8(comum) do relé 3 que está ligado ao terra.

Para que a plataforma móvel siga na direção norte, por exemplo, o programa embarcado no CLP-PIC manda um comando para acionar o relé 1; uma vez acionado o contato móvel do relé muda da posição 3 para a 1 que está ligada pelo “jumper” 15 a Vcc(12 Volts). Dessa forma o contato positivo do motor DC recebe 12 Volts estando o contato negativo já ligado ao terra acionando o motor.

Para que a plataforma móvel siga para o sul primeiramente os relés 2 e 3 serão acionados fazendo o contato negativo do motor DC ficar com 12 Volts e o terminal 1 do relé 1 ligado pelo “Jumper” 15 ao terra. Mas como o relé 1 está desligado o motor permanece desativado mas armado para o giro sul. Ao acionar o relé 1 o contato positivo do motor DC estará ligado ao terra enquanto que o negativo a Vcc invertendo assim o sentido do movimento de giro do motor e dessa forma fazendo a plataforma móvel se deslocar para o sentido sul.

4.3.3 Posicionamento dos fotosensores

Dois fotosensores (norte e sul) foram estrategicamente posicionados na plataforma móvel de modo que o piranômetro ficasse equidistante de ambos (na direção norte-sul) e que a distância entre os dois fosse igual ou menor que a mínima largura de sombra que acontece ao longo de um ano de acordo com a Equação 11 e o gráfico da Figura 31, no caso, 7,25 cm para um anel de largura $b = 3$ polegadas ou 7,62 cm. Fazendo dessa forma assegura-se que, estando o sistema no modo de busca, o fotosensor sul também estará sombreado quando o fotosensor norte encontrar a borda norte da sombra atingindo assim um equilíbrio estável. O posicionamento dos fotosensores pode ser visto na Figura 57 a e b.

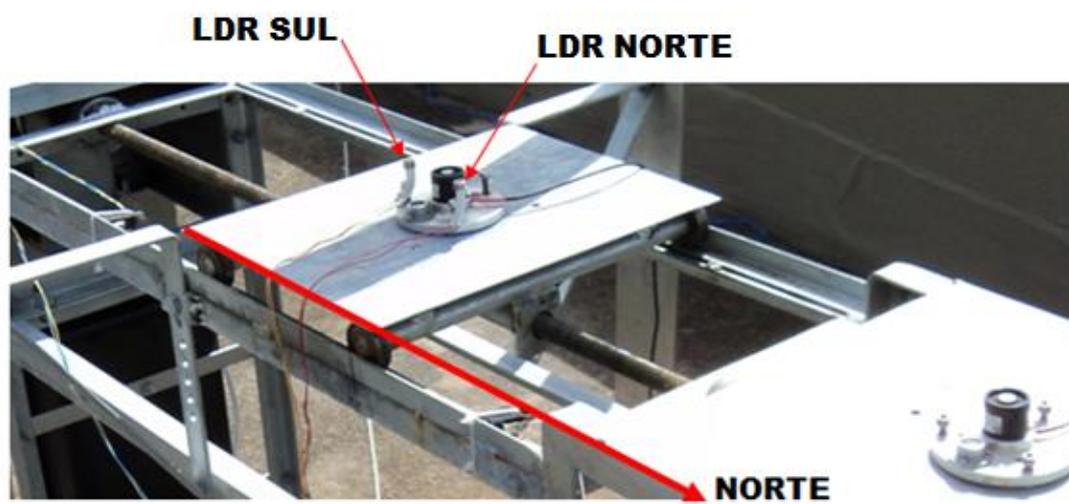


Figura 57-a



Figura 57-b

Figura 57 – Posicionamento dos fotosensores em relação ao piranômetro

4.3.4 Projeto e construção do sensor

Os fotosensores LDR norte e sul estão conectados a uma placa eletrônica (sensor) de acordo com a Figura 50. O LDR é um fotosensor que possui uma resistência variável com a luz, quanto maior a luminosidade menor será sua resistência elétrica e quanto menor a luminosidade maior será sua resistência elétrica. Portanto, baseado neste princípio foi feito o circuito da Figura 58. O LDR faz parte do circuito de modo que quando está iluminado pelo sol a partir de determinada irradiância (450 W/m^2) sua resistência elétrica diminui consideravelmente aumentando assim a corrente de dreno no transistor fazendo com que o mesmo entre na região de corte. Uma vez nessa região, a saída do coletor do transistor receberá 12 Volts. Como a saída está conectada a entrada digital do CLPPIC então este receberá 12 Volts sempre que o fotosensor se encontrar iluminado. Já quando houver sombra, a resistência elétrica do fotosensor aumentará muito, cancelando a corrente de dreno do transistor fazendo o mesmo entrar na região de saturação levando assim 0 Volts a entrada digital do CLPPIC, o que significa que na sombra o fotosensor mandará 0 Volts para o CLP. Este circuito, portanto, converte o sinal luminoso em sinal elétrico binário interpretando se a plataforma móvel está ou não abaixo da sombra do anel assumindo os estados lógicos 0 (0,0 Volts) ou 1 (12Volts). O estado 0 significa que o fotosensor está não-iluminado e portanto encontra-se debaixo da sombra do anel e o estado 1, iluminado, portanto o fotosensor estaria sob o sol.

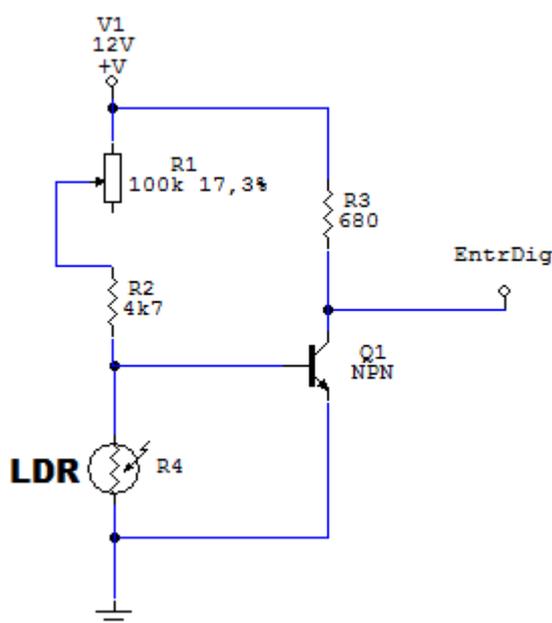


Figura 58 – Interface entre os LDR e o CLP-PIC

As chaves-fim-de-curso norte e sul, Figura 47, também enviam sinais binários para o CLP-PIC sendo 0 (0,0 Volts) o momento em que a chave não está acionada e 1 (12Volts) quando está acionada. Isto é, quando a base móvel a toca.

4.4 Variáveis medidas

Com a finalização do processo construtivo do MEA tanto mecânico quanto eletrônico iniciou-se o processo de medição. A metodologia deste processo é descrita a seguir:

4.4.1 Referência 1 – Associação de um piranômetro e um pireliômetro

a) Inicialmente foi medido indiretamente o valor da irradiância difusa de referência através do método da diferença obtido por meio da Equação 1 em que obtém-se a irradiância difusa a partir da irradiância global e da irradiância direta horizontal. Sendo a irradiância global horizontal medida por um piranômetro PSP térmico (termopilha) da marca EPPLEY com incerteza de 5%, minuto a minuto e a irradiância direta horizontal obtida através da Equação 2. Nesta equação são inseridos os valores medidos por um pireliômetro da marca EPPLEY com desvio de 5%, obtendo assim a medida da projeção horizontal da incidência solar direta normal ao sensor; os valores da irradiância direta normal ao sensor assim como os valores da irradiância global são coletados segundo a segundo e num intervalo de 60 segundos é tirada a média desses valores, sendo esta média armazenada em um sistema de aquisição de dados ou “datalogger” minuto a minuto. A Equação 2 depende do valor do cosseno do ângulo zenital (θ_Z). Nesta equação I_{DN} é igual à irradiância direta de incidência normal ao plano do sensor do pireliômetro e I_{DH} o rebatimento desta incidência no plano horizontal. O raio do sol atinge o sensor com uma inclinação θ_Z em relação à vertical local de acordo com a Figura 59.

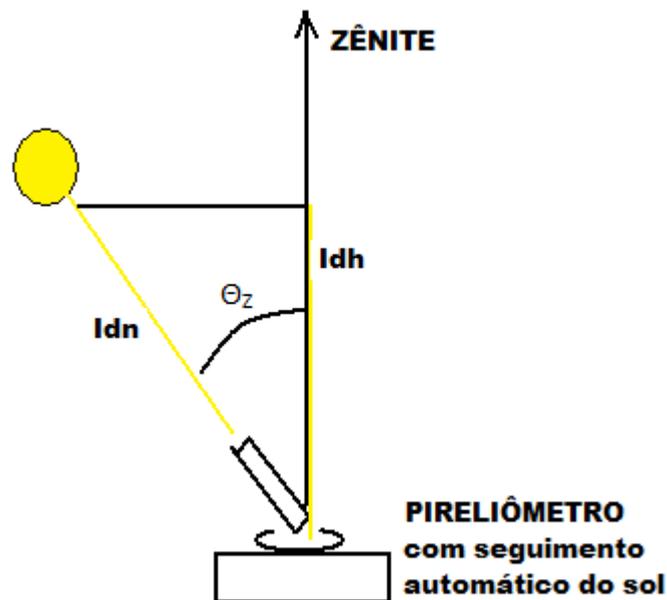


Figura 59 – Irradiância direta rebatida no plano horizontal

O cosseno de θ_z é obtido através da equação seguinte:

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (16)$$

Sendo,

θ_z = Ângulo zenital;

φ = a latitude local, no caso a latitude de Recife, $-8,05^\circ$;

δ = a declinação solar, obtida através da Equação 15;

ω = ângulo horário solar, obtido através da seguinte equação:

$$\omega = \left(\left(\text{Meio}_{\text{dia}_{\text{solar}}} - \left(\text{Hora}(\text{instante}) - \frac{\text{minuto}(\text{instante})}{60} \right) \right) * 15 \right) * (-1) \quad (17)$$

Sendo o meio-dia-solar calculado da seguinte maneira:

$$\text{Meio}_{\text{dia}_{\text{solar}}} = 12 - \frac{\text{Hora}_{\text{solar}} - \text{Hora}_{\text{padrão}}}{60} \quad (18)$$

E a $\text{Hora}_{\text{solar}} - \text{Hora}_{\text{padrão}}$ é determinada pela equação seguinte:

$$\text{Hora}_{\text{solar}} - \text{Hora}_{\text{padr\~{a}o}} = 4 * (\text{Longitude}_{\text{padr\~{a}o}} - \text{Longitude}_{\text{local}}) + E \quad (19)$$

Sendo,

Longitude-padr\~{a}o = longitude do Brasil (Brasília) = -45°

Longitude-local = longitude de Recife = -34,87°

E= Equaç\~{a}o do tempo (em minutos) expressa a seguir:

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 * \cos(B) - 0,032077 * \sin(B) - 0,014615 * \cos(2B) - 0,04089 * \sin(2B)) \quad (20)$$

onde,

$$B = (n - 1) * \frac{360}{365} \quad (21)$$

n = dia Juliano, ent\~{a}o, $1 \leq n \leq 365$. De acordo com Spencer (1971) (citado por Iqbal (1983) apud Duffie e Beckman (1991)).

b) Simultaneamente \~{a} obtenç\~{a}o da irradi\~{a}ncia difusa de refer\~{e}ncia foram retirados os valores da irradi\~{a}ncia difusa obtida pelo procedimento de Drummond atrav\~{e}s de um anel de sombreamento da marca KIPP & ZONEN, modelo CM 121B que faz uso de um piran\~{o}metro preto e branco (termopilha) de acordo com a Figura 17. As medidas coletadas do piran\~{o}metro sombreado, piran\~{o}metro este modelo preto e branco, com incerteza de 5%, foram armazenadas em um “datalogger” minuto a minuto;

c) Simultaneamente \~{a}s medidas obtidas para a irradi\~{a}ncia difusa de refer\~{e}ncia e para a irradi\~{a}ncia difusa de Drummond foram extra\~{i}dos os valores da irradi\~{a}ncia difusa atrav\~{e}s do procedimento MEA. No MEA o piran\~{o}metro sombreado \~{e} um fotodiodo da marca LI-COR com desvio da ordem de 10%. Os valores da irradi\~{a}ncia difusa medidos tamb\~{e}m foram armazenados em um “datalogger”, minuto a minuto;

d) Ap\~{o}s coletada as irradi\~{a}ncias difusas pelo procedimento de Drummond e pelo procedimento MEA foram aplicados os respectivos fatores de correç\~{a}o de banda isotr\~{o}picos e anisotr\~{o}picos considerando as condiç\~{o}es isotr\~{o}picas e anisotr\~{o}picas do c\~{e}u. Sendo o fator de correç\~{a}o isotr\~{o}pico (FCI) de Drummond ($F_{C,Drum}$) dado pela Equaç\~{a}o 9 enquanto que o fator

de correção isotrópico de Melo-Escobedo ($F_{C,ME}$), também aplicável para o Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA), dado pela Equação 13.

Drummond cita que seu modelo isotrópico pode ser aplicado em qualquer parte do mundo, mas com uma correção adicional anisotrópica de 7% para dias de céu claro e para dias de céu nublado ou parcialmente nublado uma correção adicional de 3% (LÓPEZ et al., 2003). As condições de nebulosidade diária do céu são definidas através da Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de nebulosidade diária do céu em função de K_T . Baseado em Dal Pai e Escobedo (2006)

Céu nublado	$0 \leq K_T < 0,30$
Céu parcialmente nublado	$0,30 \leq K_T \leq 0,65$
Céu claro	$0,65 < K_T \leq 1$

Os intervalos de classificação de nebulosidade diária do céu foram definidos segundo o índice de claridade diário (K_T). Segundo Duffie e Beckman (1991), o índice de claridade diário é definido como:

$$K_T = \frac{H_G}{H_0} \quad (22)$$

Onde,

H_G = Irradiação solar horizontal global diária;

H_0 = Irradiação solar horizontal extraterrestre;

Sendo H_G calculado ao se integrar as irradiâncias coletadas minuto a minuto no período das 06h:30min às 16h:30min, intervalo este correspondente a um ângulo zenital menor ou igual a 70°. Condição esta estabelecida para mitigar o chamado efeito cosseno devido ao uso de piranômetros diferentes, LI-COR (MEA), PSP e Preto e Branco (Drummond), nas medidas. Devido a esse efeito cosseno ângulos zenitais maiores que 70° causam um erro relativo elevado, entre os instrumentos, para uma determinada medida simultânea.

E sendo,

$$H_0 = \frac{24 * 3600 G_{CS}}{\pi} * \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 * n}{365} \right) * (\cos(\phi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_p) + \frac{\pi \omega_p}{180} \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta)) \quad (23)$$

Onde,

G_{CS} = Constante Solar (1367 W/m²);

n = dia Juliano;

ϕ = latitude local;

δ = Declinação solar;

ω_p = Ângulo horário do pôr-do-sol.

De acordo com Dal Pai e Escobedo (2006) a correção anisotrópica ou o Fator de Correção Anisotrópico (FCA) para o anel de sombreamento de Melo-Escobedo (ME), e portanto também aplicável para as medidas do MEA, segue o seguinte modelo baseado nos intervalos de classificação de nebulosidade, para o índice de claridade K_T :

Tabela 3: Fatores de correção anisotrópico para o MEA. Baseado em Dal Pai e Escobedo (2006)

Céu nublado	$0 \leq K_T < 0,30$	FCA = 0,973
Céu parcialmente nublado	$0,30 \leq K_T \leq 0,65$	FCA = 1,045
Céu claro	$0,65 < K_T \leq 1$	FCA = 1,125

A Tabela 3 mostra os valores de correção anisotrópica para as medidas do MEA para intervalos do índice de claridade K_T .

A equação, portanto, que rege o Fator de Correção Total (FCT) é:

$$FC_T = FC_i * FC_a \quad (24)$$

Onde,

FC_i = Fator de Correção Isotrópico;

FC_a = Fator de Correção Anisotrópico.

Portanto, para cada medida feita por cada procedimento, Drummond e MEA, é multiplicado o valor do Fator de Correção Total (FCT) para cada minuto de irradiância medida e armazenada no sistema de aquisição de dados;

- e) Depois de obtida as medidas da irradiância difusa através de cada método (referência, Drummond*FCT e MEA*FCT), para cada dia, armazenadas minuto a minuto, estas foram

comparadas no intervalo aproximado das 06h:30min às 16h:30min minuto a minuto que equivale a um intervalo de aproximadamente 600 minutos;

- f) Essa comparação baseou-se nas métricas de erro MBE e RMSE em que são feitas as comparações das irradiâncias difusas: MEA X Drummond, Drummond X Referência e MEA X Referência.

4.4.2 Referência 2 – Disco de sombreamento

O estado da arte da medição da irradiância solar difusa é feito com um sistema de ocultação do sol por um disco com seguimento em dois eixos, o disco de sombreamento (Figura 12b). O uso da referência 2 deveu-se a constatação de que o erro na medida da irradiância difusa de referência 1 era relativamente alto. Isso devido ao fato de que para obter-se a referência 1 foi necessário usar dois equipamentos, um piranômetro e um pireliômetro, e portanto carregando em si o erro inerente a esses dois instrumentos. A referência 2 é baseada em apenas um único equipamento, o disco de sombreamento (do inglês, “Shadow Ball”) sendo desta forma uma referência mais precisa. A princípio a referência 1 foi utilizada por ser imensamente adotada, como referência de irradiância difusa, na literatura. Em seguida à medida da irradiância difusa de referência 2, através de um disco de sombreamento, é feito o mesmo procedimento metodológico-experimental descrito na seção anterior a partir da letra b.

4.5 Metodologia para validação das medidas

Para poder estimar a eficácia do projeto MEA as medidas da irradiância difusa do mesmo foram comparadas com as medidas da irradiância difusa do anel de sombreamento de Drummond da marca Kipp & Zonen modelo CM121B (com piranômetro modelo preto e branco) e com as medidas das irradiâncias difusas de referência 1 e 2.

Para o cálculo do erro associado às medidas foram utilizados os indicadores estatísticos RMSE e MBE.

O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um indicativo que provê informação no desempenho de um modelo a longo prazo. Um valor positivo indica uma superestimação, enquanto que um valor negativo subestimação. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo. A raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo a curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. A desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude (DAL PAI, (2005), p.27).

As equações utilizadas para o cálculo do erro relativo médio (MBE) e para o cálculo da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) para as três comparações, isto é, MEA x Drummond, Drummond x Referência e MEA x Referência foram, respectivamente:

$$MBE_{relativo} = 100 * \frac{\left(\sum_1^N \frac{I_{difusa,MEA,i} - I_{difusa,Drummond,i}}{I_{difusa,Drummond,i}} \right)}{N} \quad (25)$$

$$RMSE_{relativo} = 100 * \sqrt{\frac{\sum_1^N \left(\frac{I_{difusa,MEA,i} - I_{difusa,Drummond,i}}{I_{difusa,Drummond,i}} \right)^2}{N}} \quad (26)$$

$$MBE_{relativo} = 100 * \frac{\left(\sum_1^N \frac{I_{difusa,Drummond,i} - I_{difusa,Referência,i}}{I_{difusa,Referência,i}} \right)}{N} \quad (27)$$

$$RMSE_{relativo} = 100 * \sqrt{\frac{\sum_1^N \left(\frac{I_{difusa,Drummond,i} - I_{difusa,Referência,i}}{I_{difusa,Referência,i}} \right)^2}{N}} \quad (28)$$

$$MBE_{relativo} = 100 * \frac{\left(\sum_1^N \frac{I_{difusa,MEA,i} - I_{difusa,Referência,i}}{I_{difusa,Referência,i}} \right)}{N} \quad (29)$$

$$RMSE_{relativo} = 100 * \sqrt{\frac{\sum_1^N \left(\frac{I_{difusa,MEA,i} - I_{difusa,Referência,i}}{I_{difusa,Referência,i}} \right)^2}{N}} \quad (30)$$

O valor de N oscila em torno de 600 (número de pontos da medida) e representa a quantidade de minutos em que foram coletadas as irradiâncias no intervalo aproximado das 06h30min às 16h30min que corresponde a um período em que o ângulo zenital (θ_z) varia até 70° .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desempenho do protótipo do Anel de Melo-Escobedo Automatizado (MEA)

O conjunto de dados inicial consistiu num total de 8 dias utilizando a referência 1 e 5 dias utilizando a referência 2. Esses dados foram coletados entre os meses de dezembro de 2011 e maio de 2012. Os dados foram coletados a cada minuto durante cada dia estudado sendo feita uma seleção dos mesmos de modo que respeitassem o critério do ângulo zenital ser menor ou igual a 70° . Isso feito para evitar o chamado efeito cosseno já mencionado. O gráfico da Figura 60 representa bem as consequências desse efeito. O gráfico mostra uma relação entre a resposta relativa dos equipamentos diante do efeito cosseno e o ângulo de incidência no plano horizontal (ângulo zenital). A curva cinza representa o percentual da resposta horizontal dada por um piranômetro Eppley PSP, usado para o cálculo das irradiâncias difusas de referência 1 e 2 em relação ao ângulo de incidência do raio solar sobre o instrumento e a curva de bolas vermelhas abertas representa a variação da resposta relativa do piranômetro LI-COR LI-200, usado para as medidas do MEA por ser um equipamento de menor custo que um piranômetro PSP. Na análise gráfica, como a metodologia deste trabalho está baseada na comparação entre as medidas do PSP e nas medidas do LI-COR quanto maior o afastamento das curvas, cinza e vermelha, maior será o erro relativo. Assim, o ângulo zenital limite de trabalho normalmente usado é de 70° para ter-se um erro relativo baixo entre os instrumentos.

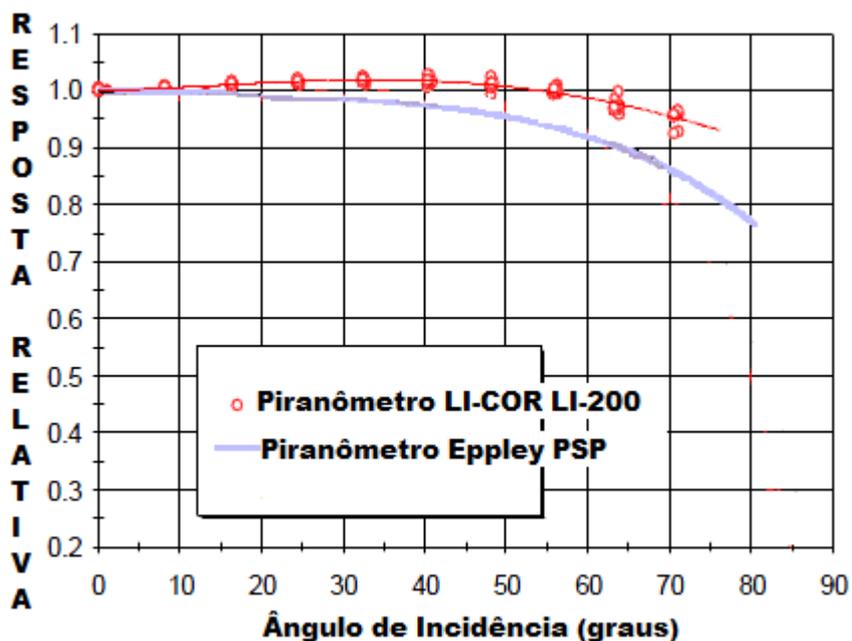


Figura 60- Influência do ângulo de incidência solar (ângulo zenital para superfícies planas) na resposta relativa de sensores de irradiância. Adaptado de King; Boyson; Hansen; Bower (1998) – Sandia National Laboratories – Albuquerque, New Mexico, USA

Também influencia na qualidade dos dados obtidos a precisão dos equipamentos utilizados, no caso do piranômetro da marca Eppley modelo PSP a incerteza é de 5% do fundo de escala (50 W/m^2) e 10% para o piranômetro da marca LI-COR. Então dados coletados em ângulos de incidência elevados (ou de baixa elevação solar) podem apresentar erro significativo já que são irradiâncias com valores da ordem da incerteza dos equipamentos (50 W/m^2) sustentando o critério de uso do filtro de 70° ou menor para o ângulo zenital.

Outra fonte de erro na comparação entre os dados de um PSP e um LI-COR, tanto para a referência 1 quanto para a referência 2, é a diferença no tempo de resposta. Enquanto no LI-COR tem-se um tempo de resposta da ordem de $10\mu\text{s}$, isto é, praticamente instantâneo, no PSP (usado nas referências 1 e 2) ou no piranômetro preto e branco (usado pelo dispositivo de Drummond) o tempo de resposta é da ordem de 10 segundos. Isto fica mais claro ao observar-se a Tabela 4 e a representação desta tabela na Figura 61. A tabela apresenta uma amostra da coleta dos dados da irradiância global através do piranômetro LI-COR e através do piranômetro PSP com o instante simultâneo em que foram coletados estes dados. A variação da irradiância deve-se a passagem de uma nuvem encobrindo o sol. No instante 11h04min tem-se praticamente a mesma medida de irradiância. O instante 11h06min foi o instante provável em que a nuvem começou a passar na frente do sol; nota-se a rápida queda de

irradiância no piranômetro LI-COR e a “lenta” queda no piranômetro PSP. Enquanto que no LI-COR a mínima irradiância é atingida no instante 11h07min, no PSP esse mínimo é alcançado no instante 11h08min. E no instante 11h09min a irradiância no LI-COR indica a total passagem da nuvem acusando um valor de 1215 W/m² contra 368,1 W/m² no mesmo instante para o piranômetro PSP que por ter um tempo de resposta maior “demora” a acusar a passagem da nuvem. Essa alta diferença apresentada no instante 11h09min, por exemplo, é uma fonte de erro bastante significativa já que para o cálculo do RMSE bastam alguns valores discrepantes para que o erro final do conjunto de dados seja alto.

Tabela 4 - Diferença no tempo de resposta entre os piranômetros PSP e LI-COR

Irradiância Horizontal Global LICOR	Irradiância Horizontal Global PSP	TEMPO
1185	1195	11:04
1030	1225	11:05
650,2	821	11:06
329,6	484,6	11:07
669,8	344,3	11:08
1215	368,1	11:09
1188	720,6	11:10
1169	1163	11:11

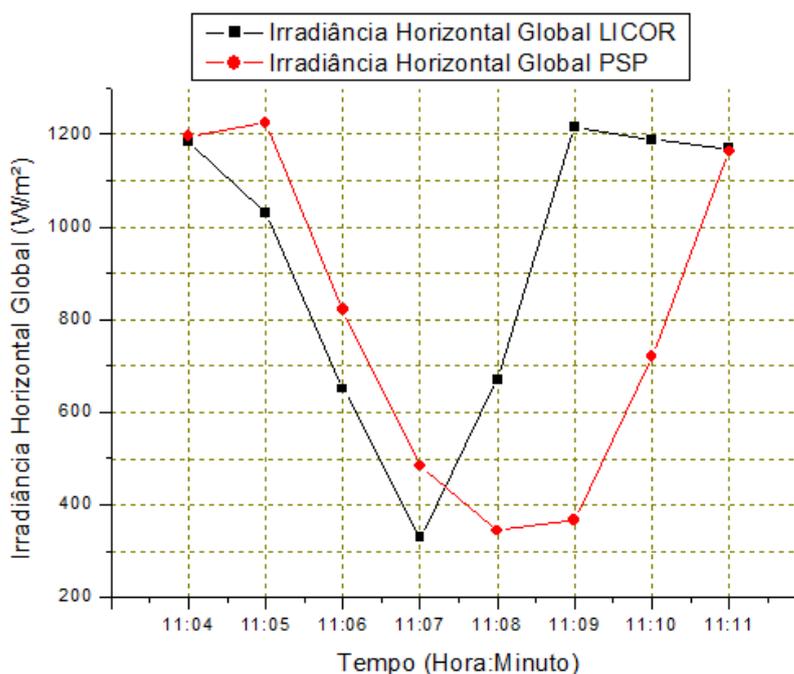


Figura 61 – Gráfico representativo da tabela 4

5.1.1 Referência 1 - Associação de um piranômetro e um pireliômetro

A Tabela 5 apresenta os dias em que foi feita uma análise comparativa das medidas obtidas pelo MEA para a irradiância difusa em comparação com as medidas do dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e em comparação com a irradiância difusa de referência 1 obtida pelo método da diferença em que se subtrai a irradiância global medida por um piranômetro da irradiância direta medida por um pireliômetro. A tabela apresenta o dia do ano, seu correspondente dia Juliano (n), o índice de claridade (K_T) para aquele dia que será comparado com os intervalos dados na Tabela 2 de modo a poder-se afirmar se o dia é de céu nublado, céu parcialmente nublado ou dia de céu claro.

Tabela 5 - Médias diárias da irradiância global (piranômetro), da irradiância direta horizontal (pireliômetro) e das irradiâncias difusas de referência 1, de Drummond e MEA

Dia do Ano	n	Kt	Global (W/m ²)	Direta (W/m ²)	Difusa(Ref1) (W/m ²)	Difusa(Drum) (W/m ²)	Difusa(MEA) (W/m ²)
21/12/2011	355	0,34	359,11	72,91	286,2	283,64	280,47
24/12/2011	358	0,41	444,81	115,21	329,6	313,73	301,22
25/12/2011	359	0,51	537,06	154,08	382,98	356,73	339,76
26/12/2011	360	0,47	492,98	157,42	335,56	317,26	305,39
01/01/2012	1	0,58	635,07	340,32	294,75	256,96	239,46
02/01/2012	2	0,66	705,65	411,83	293,82	258,58	248,12
18/01/2012	18	0,39	429,51	74,73	354,78	349,81	327,78
19/01/2012	19	0,26	290,54	22,34	268,2	268,58	241,61
				MÉDIA	318,24	300,66	285,48
				DESVIO PADRÃO	38,98	39,65	39,36

É observado que nesta amostra particular de dados há uma predominância de dias de céu parcialmente nublado em Recife, isto é, $0,30 \leq k_t \leq 0,65$ havendo neste intervalo de dias apenas um dia de céu claro, dia 2 de janeiro e apenas um dia de céu nublado, dia 19 de janeiro. As irradiâncias difusas de referência 1, de Drummond e MEA têm as respectivas médias: 318,24 W/m², 300,66 W/m² e 285,48 W/m². Considerando os baixos valores dos desvios padrões da referência 1 e dos dois equipamentos em relação aos valores da amostra: 38,98 W/m², 39,65 W/m² e 39,36 W/m² respectivamente, pode-se fazer uma comparação entre as médias encontradas. Portanto o erro relativo médio do dispositivo MEA em relação à

referência 1 fica em torno de -10,3% enquanto que o de Drummond é de -5,5%. A Tabela 6 resume os possíveis fatores de erros que causaram os erros das medidas.

Tabela 6: Fatores de erros dos dispositivos

<p>Erro de precisão típico ao piranômetro LICOR que é de 10% contra um erro de 5% para um piranômetro preto e branco usado no dispositivo de Drummond;</p>
<p>Erro inerente ao tempo de resposta do LI-COR e do PSP já que houve uma maior quantidade de dias parcialmente nublados indicando a presença de grande quantidade de nuvens passantes;</p>
<p>Banda de sombra nos anéis de sombreamento o que os faz subestimar o valor real da irradiância difusa. Sendo mais evidente o erro no MEA devido a sua maior banda de sombra, em relação ao tamanho do sensor, se comparada com a banda de sombra do Drummond;</p>
<p>Erro de deriva do LI-COR maior que o erro de deriva do piranômetro preto e branco, erro este devido a não estabilidade do sensor.</p>

A Figura 62 obtida através da Tabela 5 denota a subestimação dos valores obtidos pelo MEA e pelo Drummond devido aos respectivos valores de irradiância estarem abaixo da reta que representa a irradiância difusa de referência.

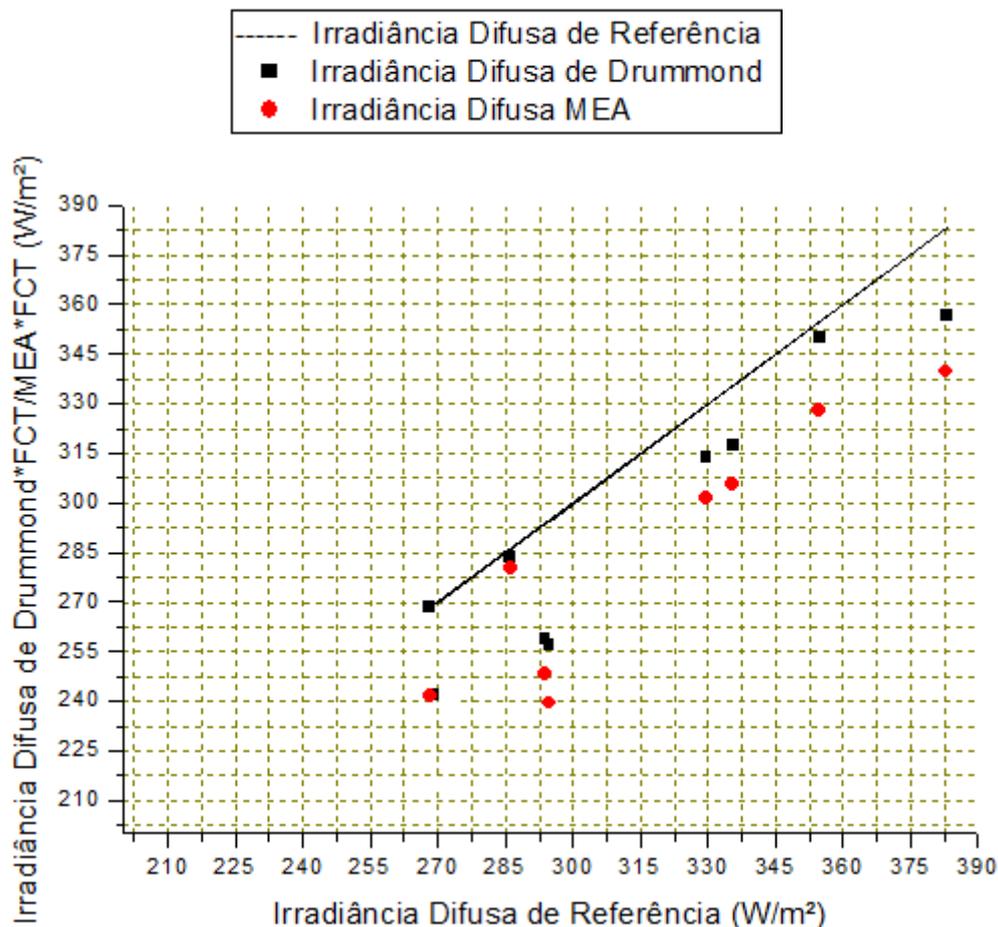


Figura 62 – Valores médios diários de MEA e Drummond versus irradiância difusa de referência

A irradiância difusa medida pelo dispositivo de Drummond em função da irradiância difusa medida pelo MEA está mostrada nos gráficos da Figura 63a-c para três dias representativos: um dia de céu claro, um dia de céu parcialmente nublado e um dia de céu nublado, sendo os dias Julianos 2, 360 e 19 respectivamente. Assim como, nos gráficos da Figura 64a-c tem-se a comparação entre a irradiância difusa de referência 1 versus a de Drummond como também nos gráficos da Figura 65a-c a irradiância difusa de referência 1 versus a irradiância difusa MEA para esses mesmos dias representativos.

Observa-se na Figura 63a-c que a comparação entre MEA e Drummond é satisfatória tendo em vista que os coeficientes angulares e os coeficientes de correlação, R^2 , são próximos de um. Indicando que mesmo que o dispositivo MEA tenha uma banda de sombra mais larga e que os piranômetros não sejam idênticos, ainda assim consegue obter resultados comparáveis aos resultados do Drummond.

Já nas Figuras 64a-c e 65a-c, que mostra a comparação entre as irradiâncias difusas Drummond x referência 1 e MEA x referência 1, respectivamente, se pode notar uma semelhança entre os gráficos de céu claro, nublado e parcialmente nublado. Evidenciando que ambos os equipamentos de Drummond e MEA, expressam medidas comparáveis nas mesmas condições de céu.

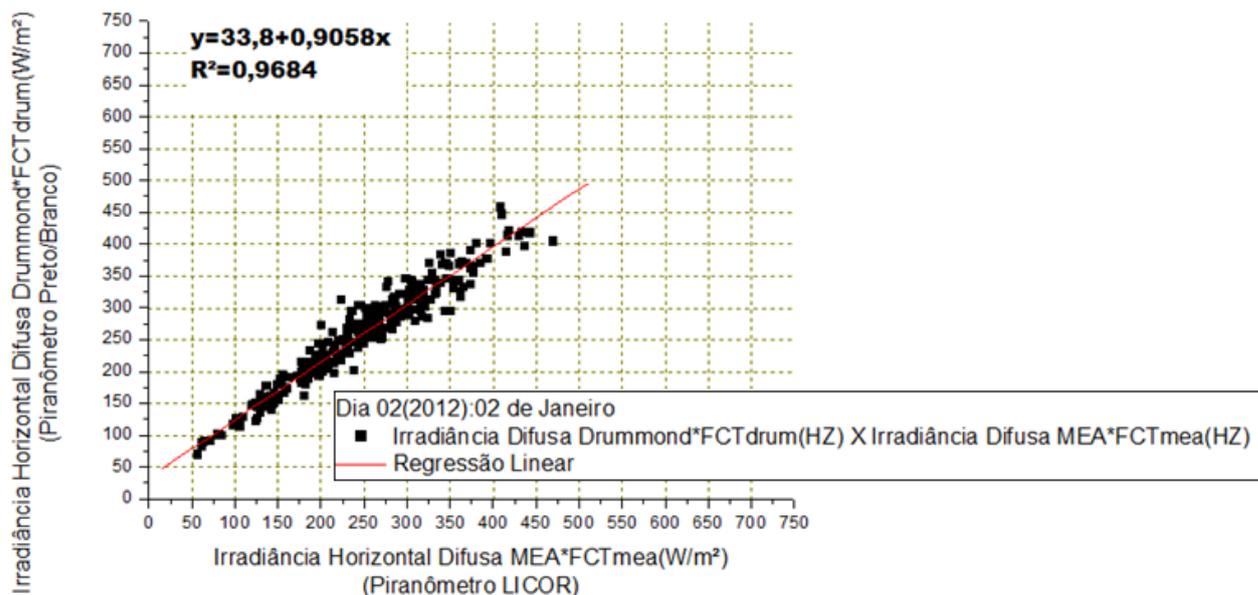


Figura 63 a – Dia de céu claro (2 de janeiro). MEA x Drummond

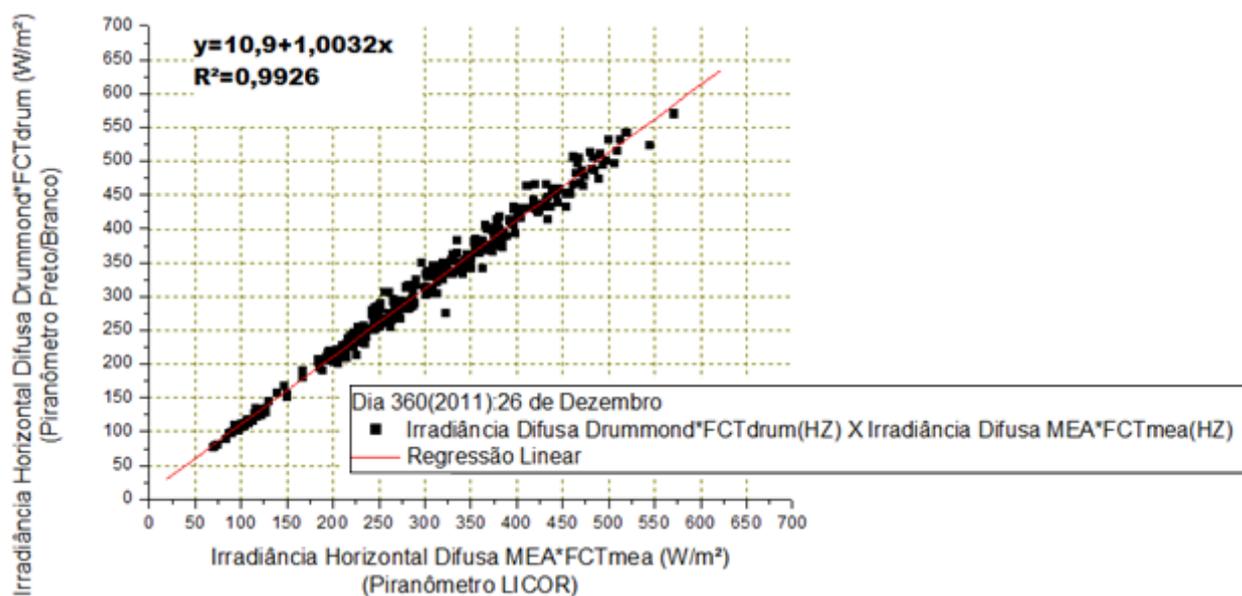


Figura 63 b – Dia de céu parcialmente nublado (26 de dezembro). MEA x Drummond

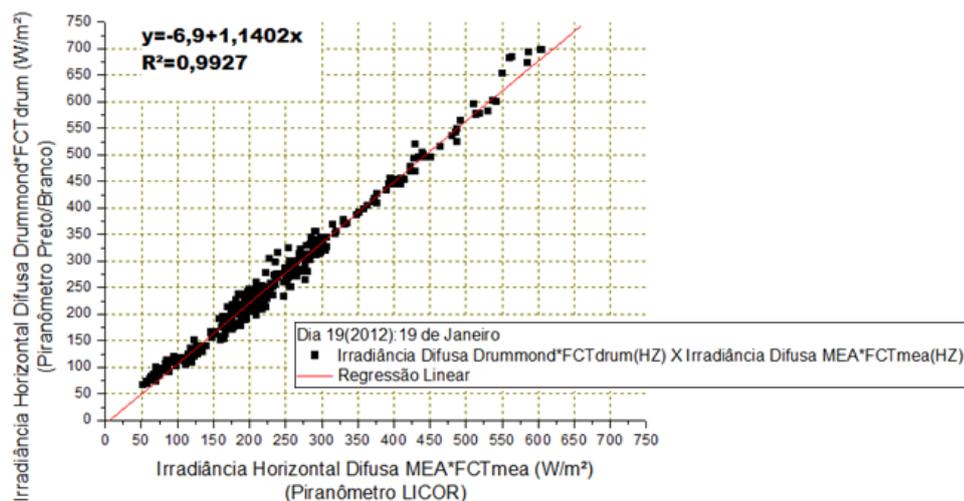


Figura 63 c – Dia de céu nublado (19 de janeiro). MEA x Drummond

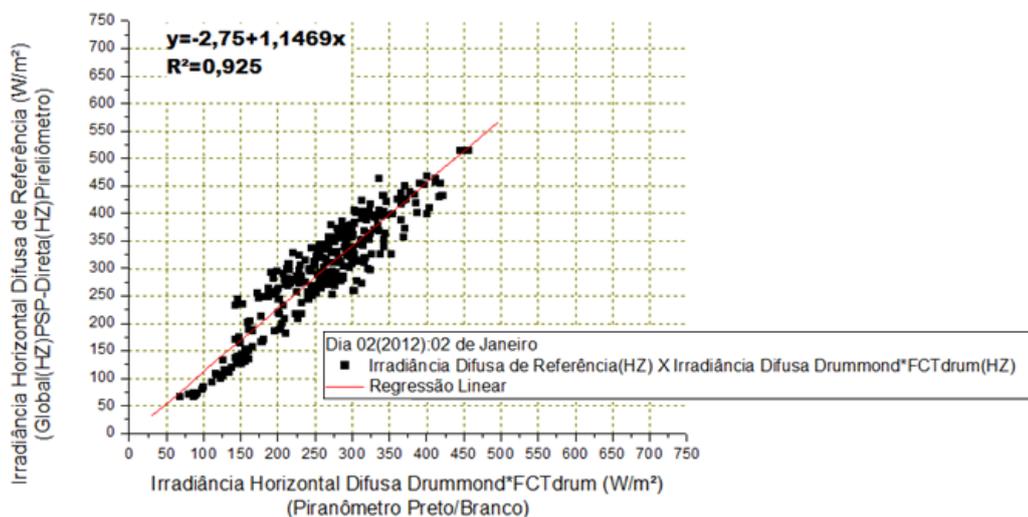


Figura 64 a – Dia de céu claro (2 de janeiro). Drummond x Referência 1

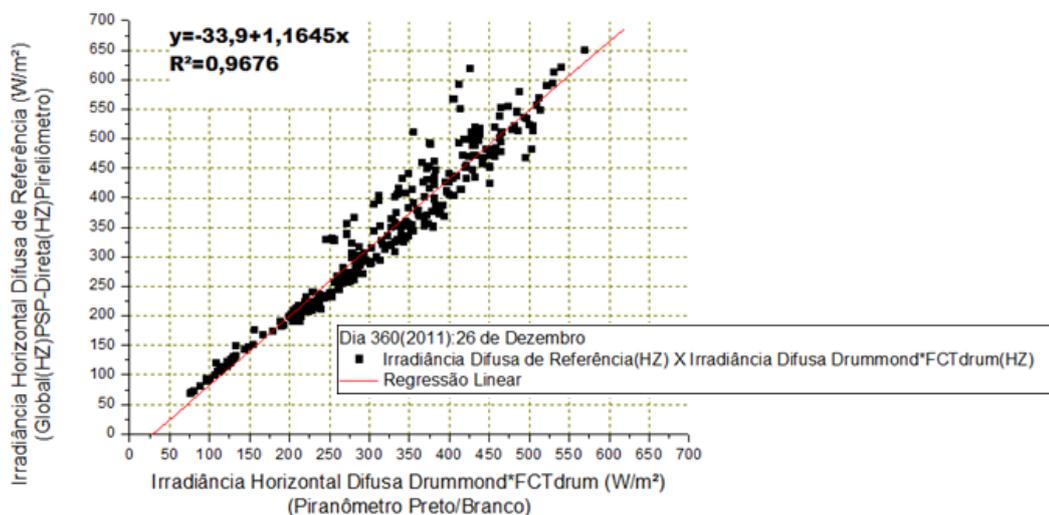


Figura 64 b – Dia de céu parcialmente nublado (26 de dezembro). Drummond x Referência 1

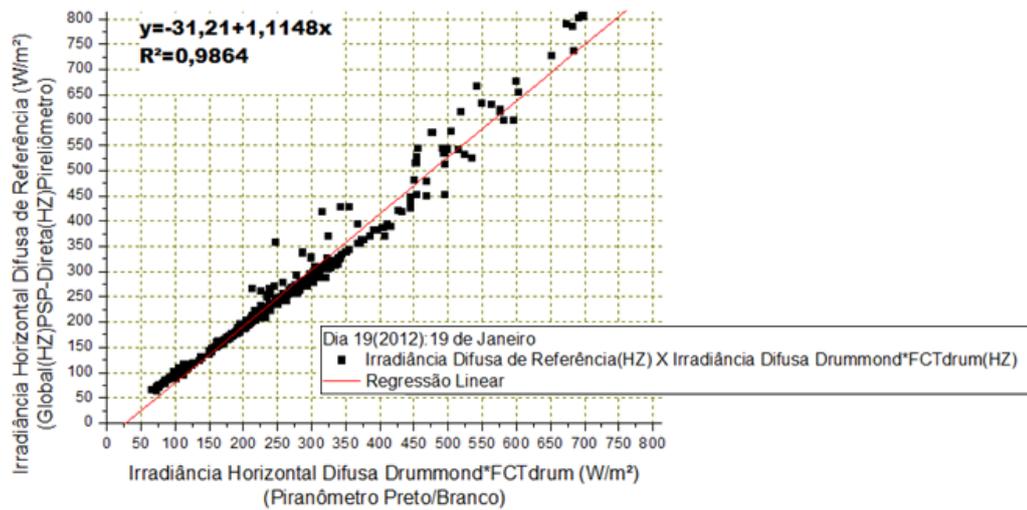


Figura 64 c – Dia de céu nublado (19 de janeiro). Drummond x Referência 1

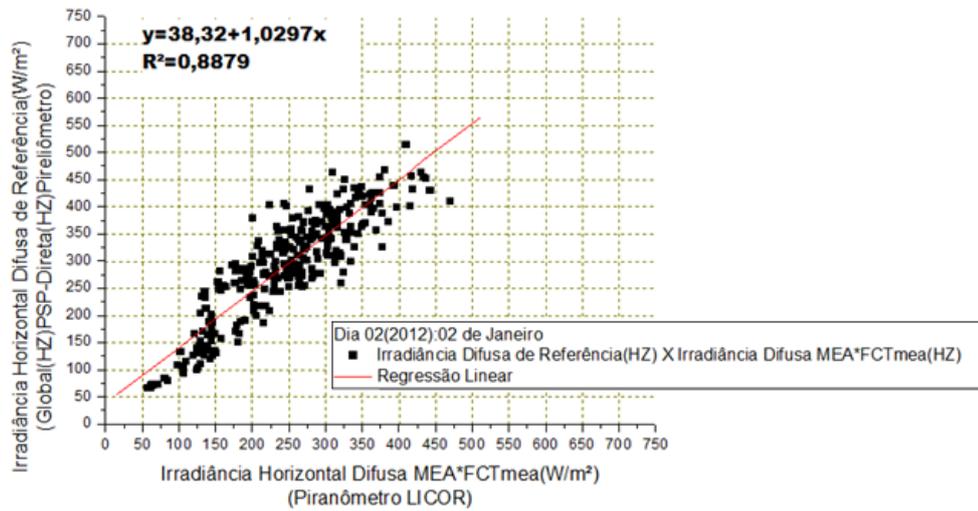


Figura 65 a- Dia de céu claro (2 de janeiro). MEA x Referência 1

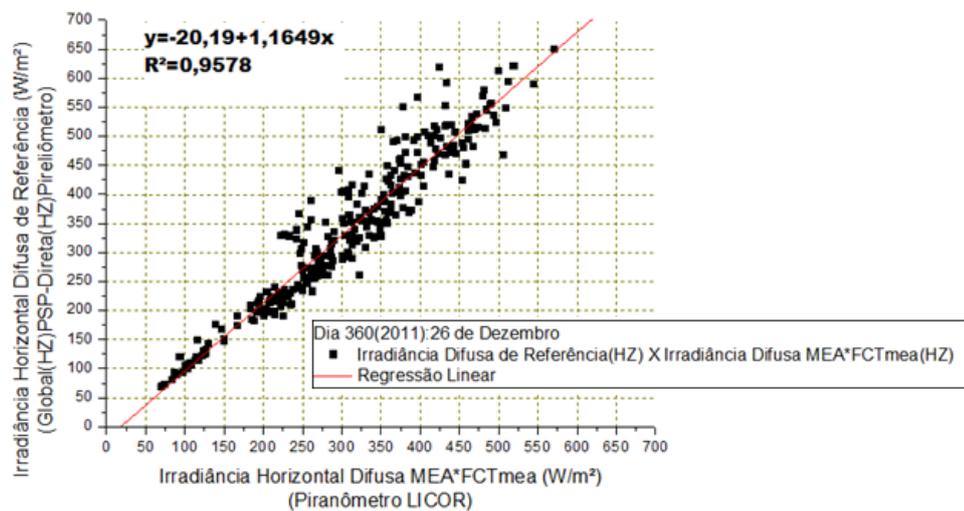


Figura 65 b– Dia de céu parcialmente nublado (26 de dezembro). MEA x Referência 1

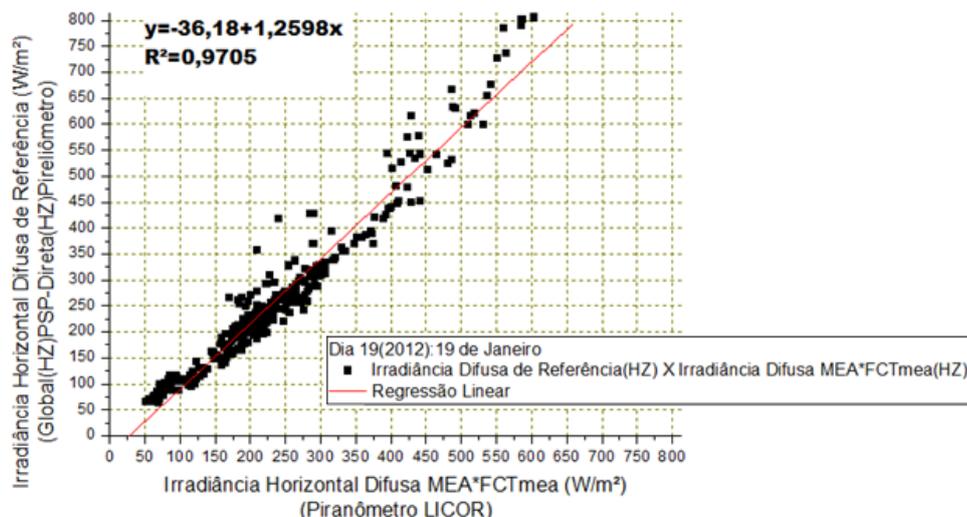


Figura 65 c – Dia de céu nublado (19 de janeiro). MEA x Referência 1

Um resumo dos resultados das análises estatísticas, para os 8 dias, entre as irradiâncias difusas de MEA x Drummond, de Drummond x referência 1 e de MEA x referência 1 é mostrado na Tabela 7. As irradiâncias difusas medidas pelos dispositivos de Drummond e MEA foram corrigidas pelos respectivos fatores de correção isotrópicos e anisotrópicos. Os respectivos gráficos e planilhas dos erros dos dias analisados se encontram no Apêndice A.

Os valores absolutos de RMSE e MBE, na Tabela 7, são obtidos ao multiplicar o valor de MBE e RMSE relativos pelos valores médios diários da Tabela 5. Os valores máximos de MBE obtidos nas comparações entre MEA x Drummond, Drummond x referência 1 e MEA x referência 1 são respectivamente, $-25,57 \text{ W/m}^2$ (-9,52%), $-31,83 \text{ W/m}^2$ (-10,8%) e $-52,14 \text{ W/m}^2$ (-17,69%). Para RMSE os valores máximos obtidos são respectivamente $31,29 \text{ W/m}^2$ (11,65%), $53,11 \text{ W/m}^2$ (18,02%) e $67,73 \text{ W/m}^2$ (22,98%). Os valores de MBE e RMSE da comparação entre Drummond x referência encontrados na literatura, como por exemplo, em Kudish e Evseev (2008) e em López *et al.*(2004) possuem valores máximos na ordem de -12% e 18%, respectivamente, mostrando que os resultados, na comparação MEA versus referência 1, foram equiparáveis aos resultados da literatura. Também se pode observar que os valores negativos de MBE na comparação MEA x Drummond significam que o MEA está subestimando o dispositivo de Drummond. Isso indica um erro sistemático de valor negativo que pode ter como causas principais os fatores citados na Tabela 6.

Tabela 7 – MEA x Drummond, Drummond x Referência 1 e MEA x Referência 1

Irradiâncias Difusas MEA x Drummond				
Dia do Ano	n	Kt	RMSE(W/m ²)*	MBE(W/m ²)*
21/12/2011	355	0,34	(17,25)(6,08%)	(-2,81)(-0,99%)
24/12/2011	358	0,41	(23,78)(7,58%)	(-11,7)(-3,73%)
25/12/2011	359	0,51	(27,4)(7,68%)	(-19,66)(-5,51%)
26/12/2011	360	0,47	(18,37)(5,79%)	(-12,79)(-4,03%)
01/01/2012	1	0,58	(27,93)(10,87%)	(-19,73)(-7,68%)
02/01/2012	2	0,66	(25,73)(9,95%)	(-13,06)(-5,05%)
18/01/2012	18	0,39	(28,54)(8,16%)	(-22,11)(-6,32%)
19/01/2012	19	0,26	(31,29)(11,65%)	(-25,57)(-9,52%)
Irradiâncias Difusas Drummond x Referência 1				
Dia do Ano	n	Kt	RMSE(W/m ² **	MBE(W/m ² **
21/12/2011	355	0,34	(29,05)(10,15%)	(3,55)(1,24%)
24/12/2011	358	0,41	(36,16)(10,97%)	(-6,79)(-2,06%)
25/12/2011	359	0,51	(44,23)(11,55%)	(-22,52)(-5,88%)
26/12/2011	360	0,47	(32,08)(9,56%)	(-10,23)(-3,05%)
01/01/2012	1	0,58	(53,11)(18,02%)	(-31,83)(-10,8%)
02/01/2012	2	0,66	(49,57)(16,87%)	(-27,15)(-9,24%)
18/01/2012	18	0,39	(24,59)(6,93%)	(0,11)(0,03%)
19/01/2012	19	0,26	(20,3)(7,57%)	(7,48)(2,79%)
Irradiâncias Difusas MEA x Referência 1				
Dia do Ano	n	Kt	RMSE(W/m ² **	MBE(W/m ² **
21/12/2011	355	0,34	(39,18)(13,69%)	(1,52)(0,53%)
24/12/2011	358	0,41	(49,7)(15,08%)	(-18)(-5,46%)
25/12/2011	359	0,51	(62)(16,19%)	(-41,63)(-10,87%)
26/12/2011	360	0,47	(40,7)(12,13%)	(-23,19)(-6,91%)
01/01/2012	1	0,58	(67,73)(22,98%)	(-52,14)(-17,69%)
02/01/2012	2	0,66	(58,65)(19,96%)	(-41,13)(-14%)
18/01/2012	18	0,39	(40,62)(11,45%)	(-21,89)(-6,17%)
19/01/2012	19	0,26	(35,3)(13,16%)	(-18,18)(-6,78%)

*RMSE/MBE são percentagens aplicadas sobre o valor médio diário de Idifusa, Drummond dados na Tabela 5;

**RMSE/MBE são percentagens aplicadas sobre o valor médio diário de Idifusa, referência 1 dados na Tabela 5.

As Figuras 66, 68 e 70 mostram os gráficos da irradiância solar global, direta, difusa de referência 1, difusa de Drummond e difusa MEA para os três dias representativos, 2, 360 e 19 respectivamente, em Recife. Já as Figuras 67, 69 e 71 mostram os gráficos das irradiâncias

solar difusas de referência 1, Drummond e MEA em destaque para os dias representativos. Pode-se observar que a difusa obtida pelo MEA acompanhou satisfatoriamente a difusa de Drummond e a difusa de referência 1, isto é, quando a irradiância difusa cresceu ou decresceu com a passagem de nuvens, os dois equipamentos e a referência 1 tiveram comportamento semelhante. Os gráficos indicam que o MEA acompanhou igualmente todas as flutuações ocorridas na irradiância difusa ao longo do dia, registradas pelo arranjo de referência formado por um piranômetro PSP e um pireliômetro.

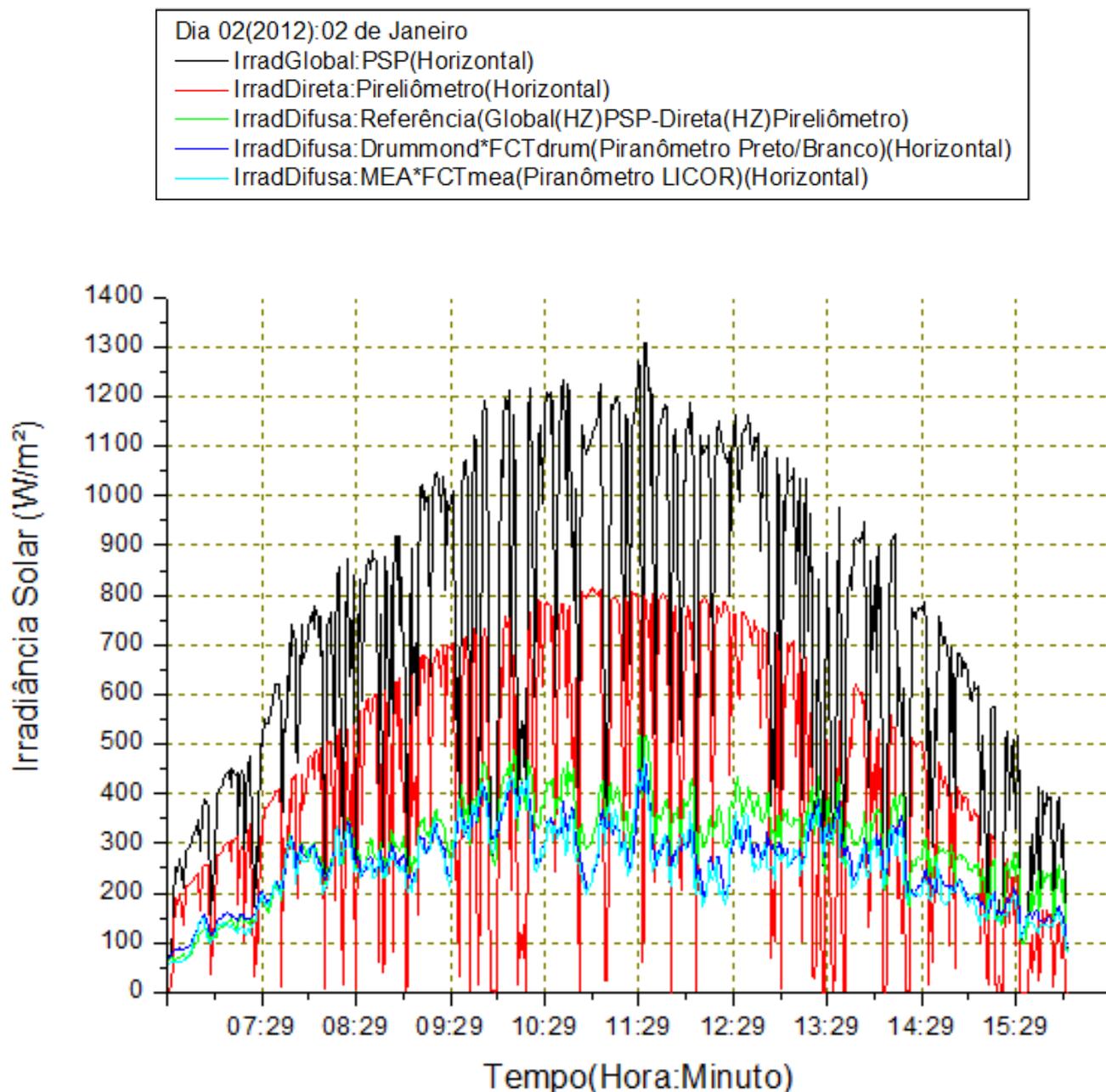


Figura 66 – Irradiância global, direta, difusas de referência 1, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, método da diferença, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 02/01/2012

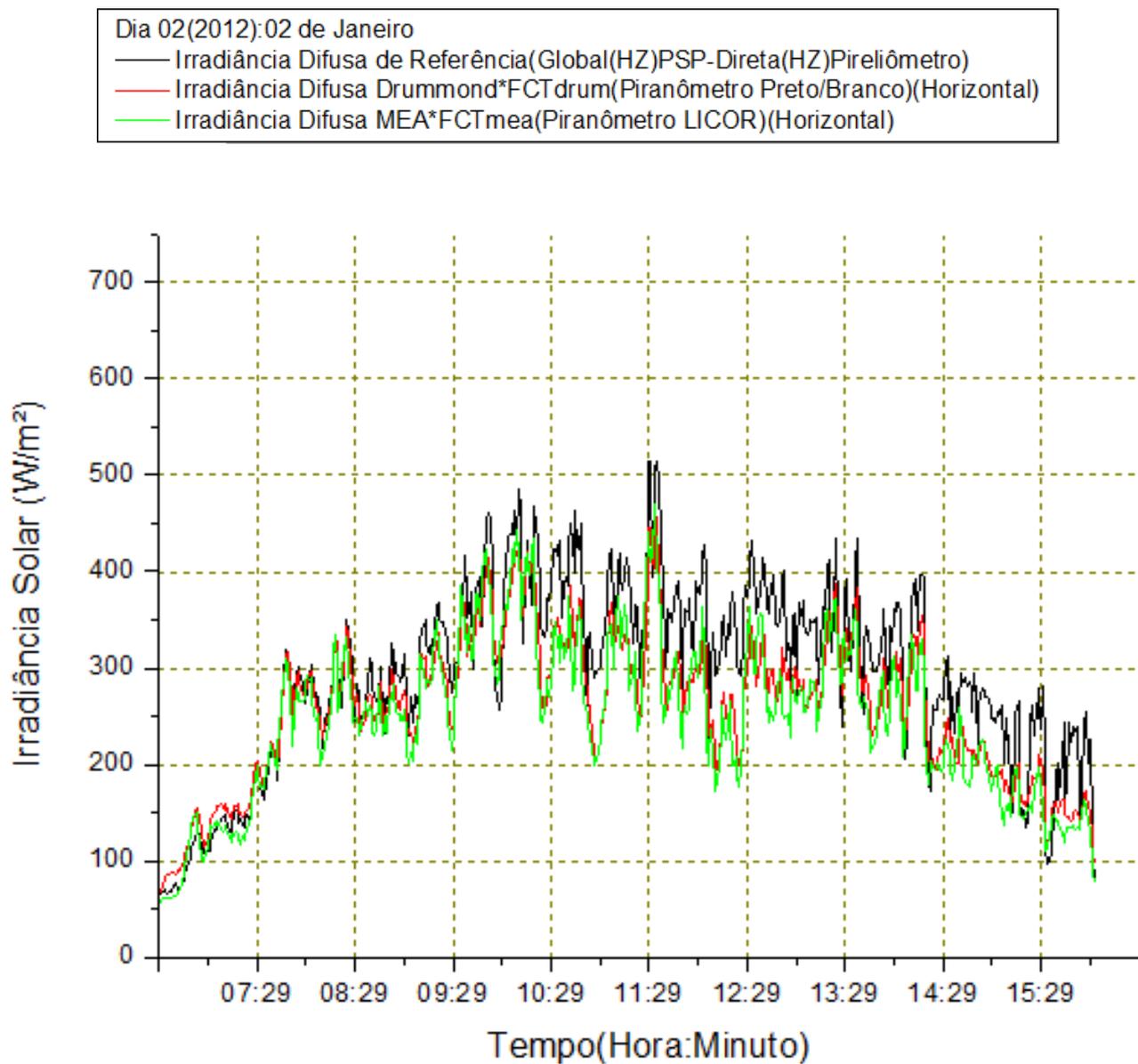


Figura 67 – Irradiância difusa de referência 1, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 02/01/2012

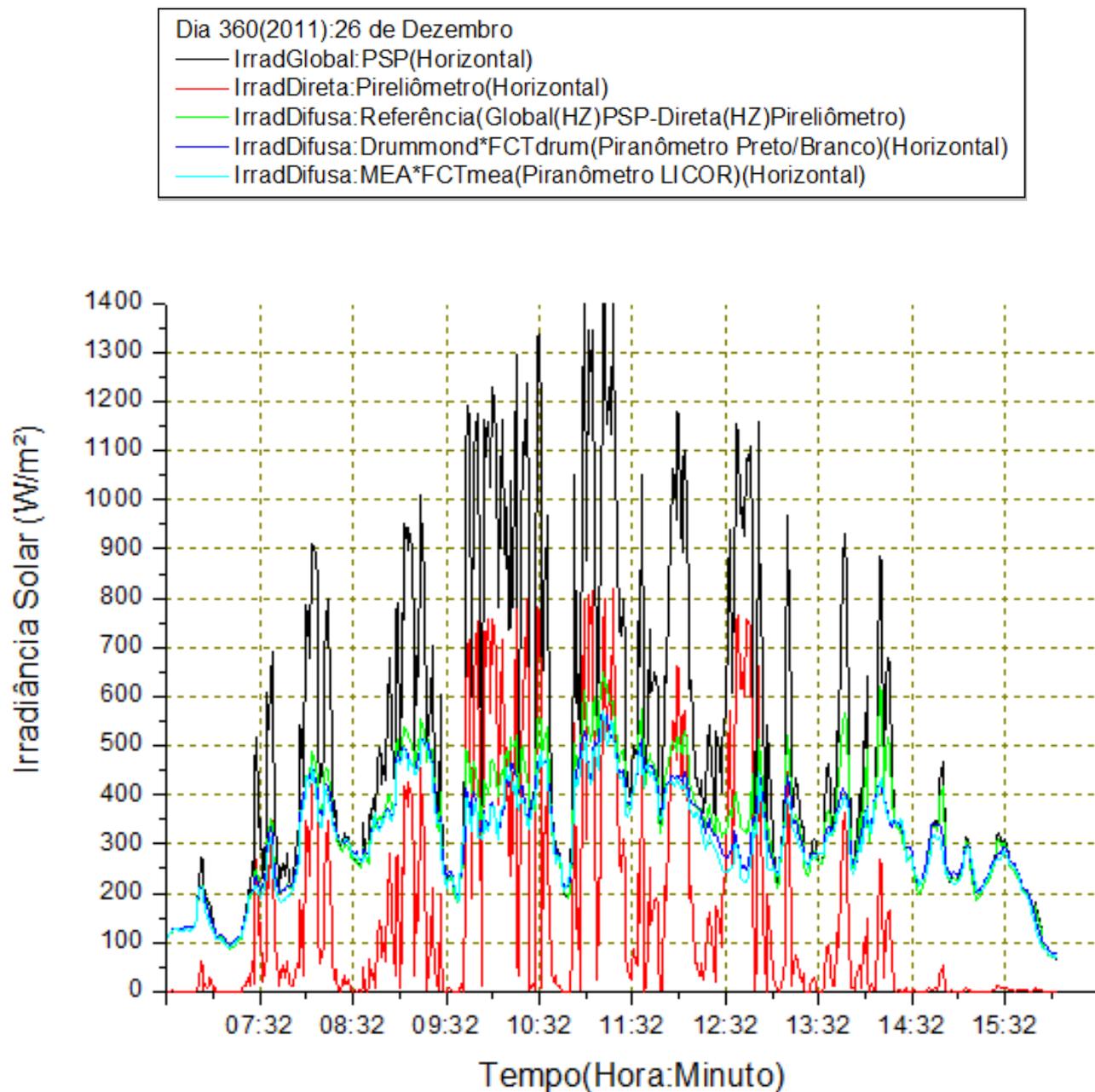


Figura 68 – Irradiância global, direta, difusas de referência 1, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, método da diferença, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 26/12/2011

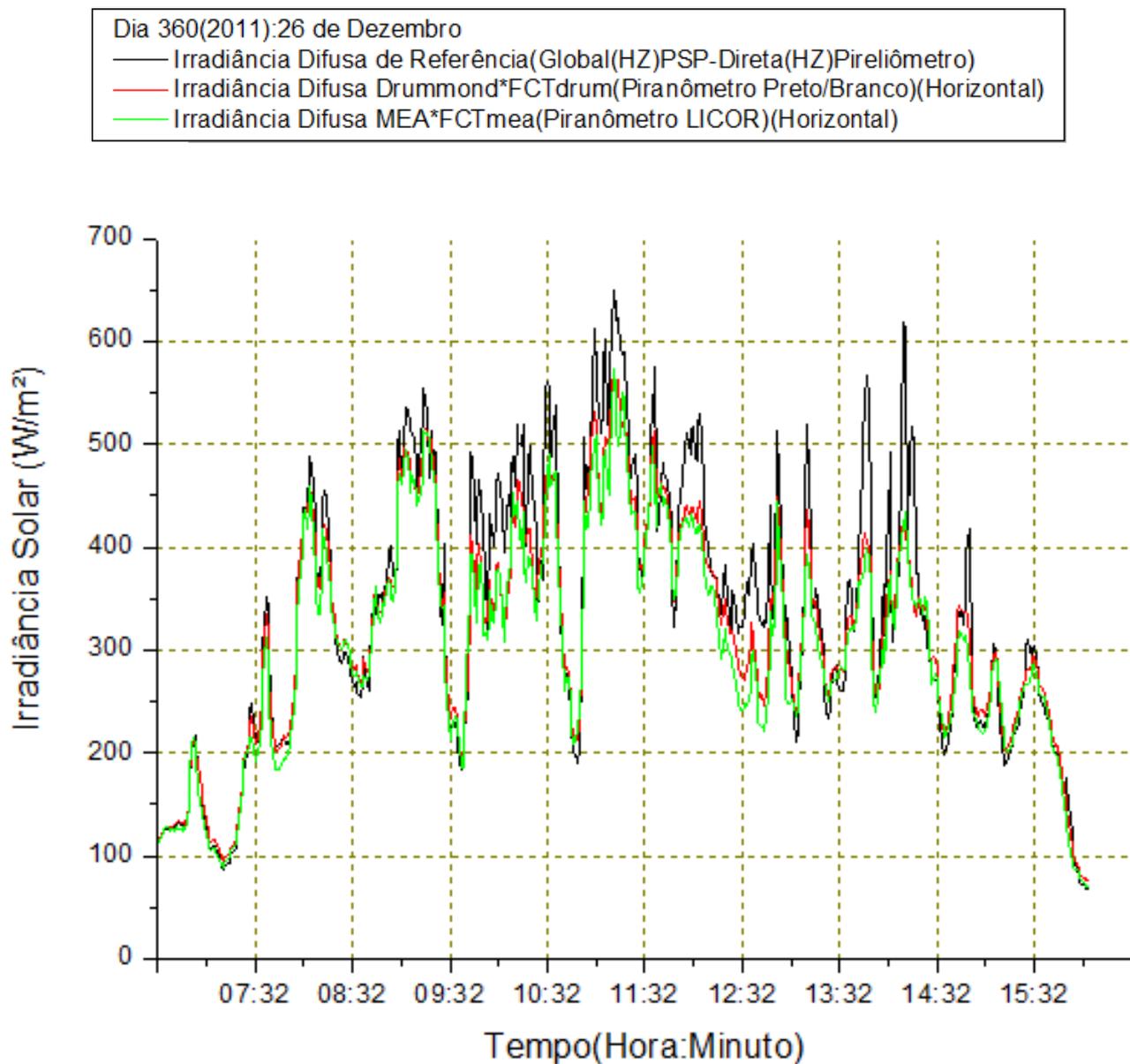


Figura 69 – Irradiância difusa de referência 1, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 26/12/2011

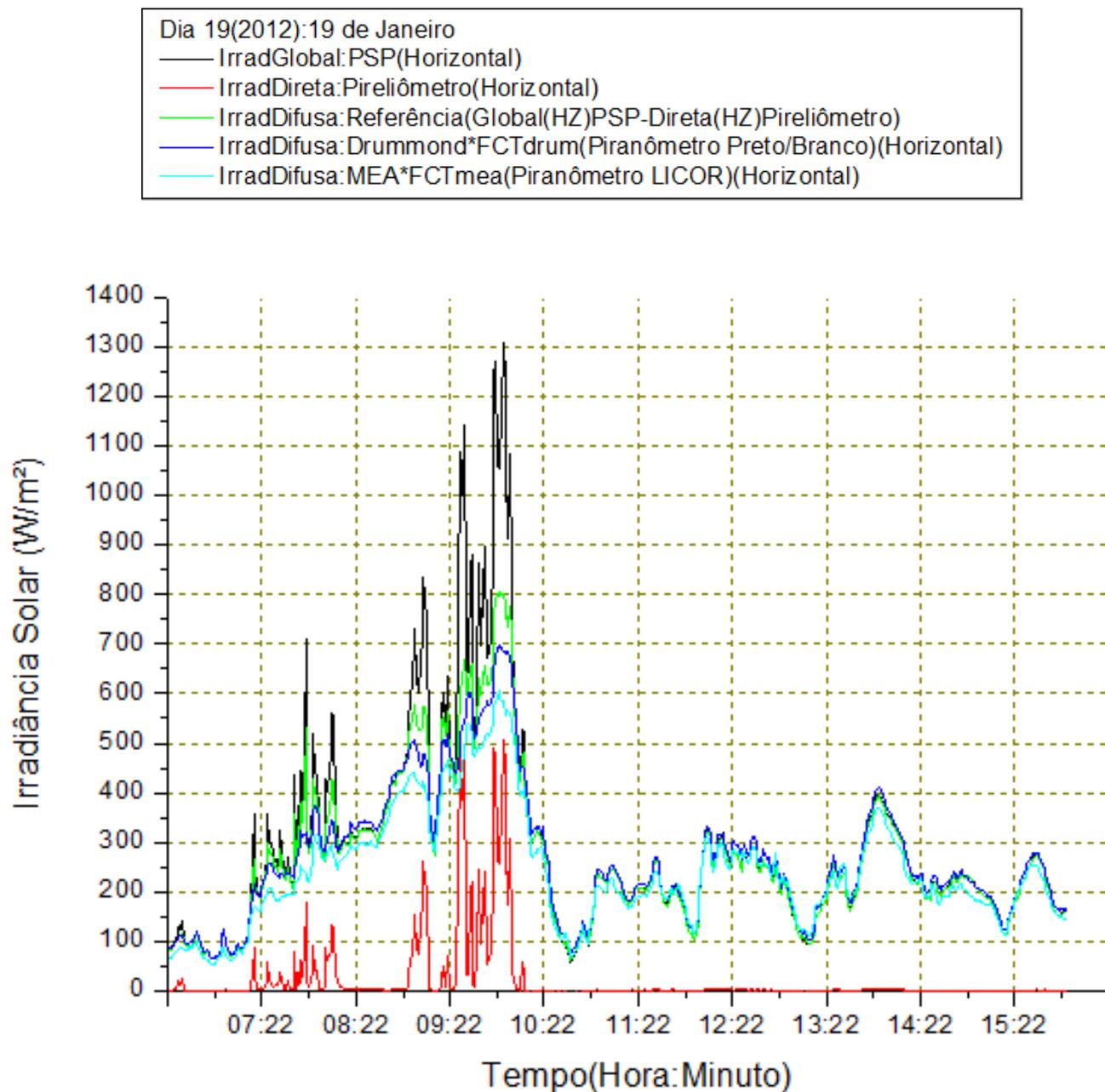


Figura 70 – Irradiância global, direta, difusas de referência 1, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, método da diferença, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 19/01/2012

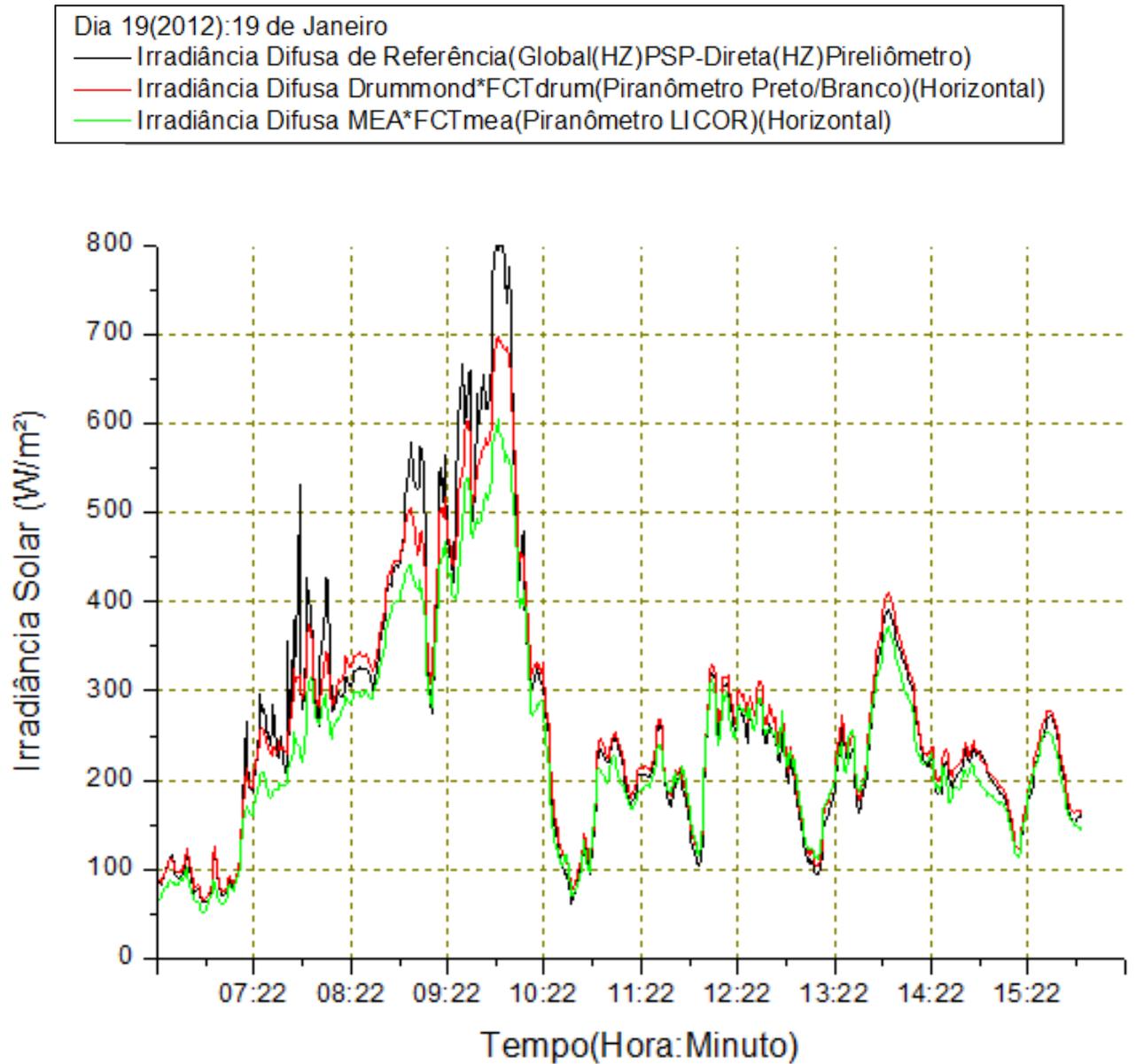


Figura 71 – Irradiância difusa de referência 1, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 19/01/2012

5.1.2 Referência 2 - Disco de sombreamento

A Tabela 8 assim como a Tabela 5 apresenta os dias em que foi feita uma análise comparativa das medidas obtidas pelo MEA para a irradiância difusa em comparação com as medidas do dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e em comparação com a irradiância difusa de referência 2 na qual se utiliza um disco de sombreamento. A tabela apresenta o dia do ano, seu correspondente dia Juliano (n), o índice de claridade (K_T) para aquele dia que será comparado com os intervalos dados na Tabela 2 de modo a poder-se afirmar se o dia é de céu nublado, céu parcialmente nublado ou dia de céu claro.

Tabela 8 - Médias diárias da irradiância global (piranômetro), da irradiância direta horizontal (pireliômetro) e das irradiâncias difusas de referência 2, de Drummond e MEA

Dia do Ano	n	Kt	Global (W/m ²)	Direta (W/m ²)	Difusa(Ref2) (W/m ²)	Difusa(Drum) (W/m ²)	Difusa(MEA) (W/m ²)
27/04/2012	118	0,64	640,72	479,74	148,37	157,68	130,04
28/04/2012	119	0,61	604,72	351,26	240,1	248,16	223,09
29/04/2012	120	0,66	667,64	508,73	140,05	159,43	135,61
30/04/2012	121	0,57	597,05	381,41	203,75	209,72	183,74
01/05/2012	122	0,64	671,8	552,35	99,73	110,25	84,85
				MÉDIA	166,4	177,05	151,47
				DESVIO PADRÃO	55,43	53,08	53,2

Há nesta amostra, de acordo com o critério de Dal Pai e Escobedo (2006) sobre as condições de nebulosidade do céu baseadas em K_T , quatro dias de céu parcialmente nublado e um dia de céu claro. As irradiâncias difusas de referência 2, de Drummond e MEA para esta amostra têm as respectivas médias: 166,4 W/m², 177,05 W/m² e 151,47 W/m². Fazendo-se uma comparação entre as médias encontradas obtêm-se um erro relativo médio do dispositivo MEA em relação à referência 2 de -9,0 % subestimando o valor de referência obtida através do disco de sombreamento enquanto que o erro relativo médio do dispositivo de Drummond em relação à referência 2 é de +6,4 % superestimando o valor referencial. É importante também observar que diferentemente do gráfico da Figura 62 em que ambas as medidas, MEA e Drummond, subestimam o valor da referência 1, no gráfico da Figura 72, gerado pelos dados da Tabela 8, o MEA subestima os valores da referência 2 enquanto que o dispositivo de Drummond a superestima.

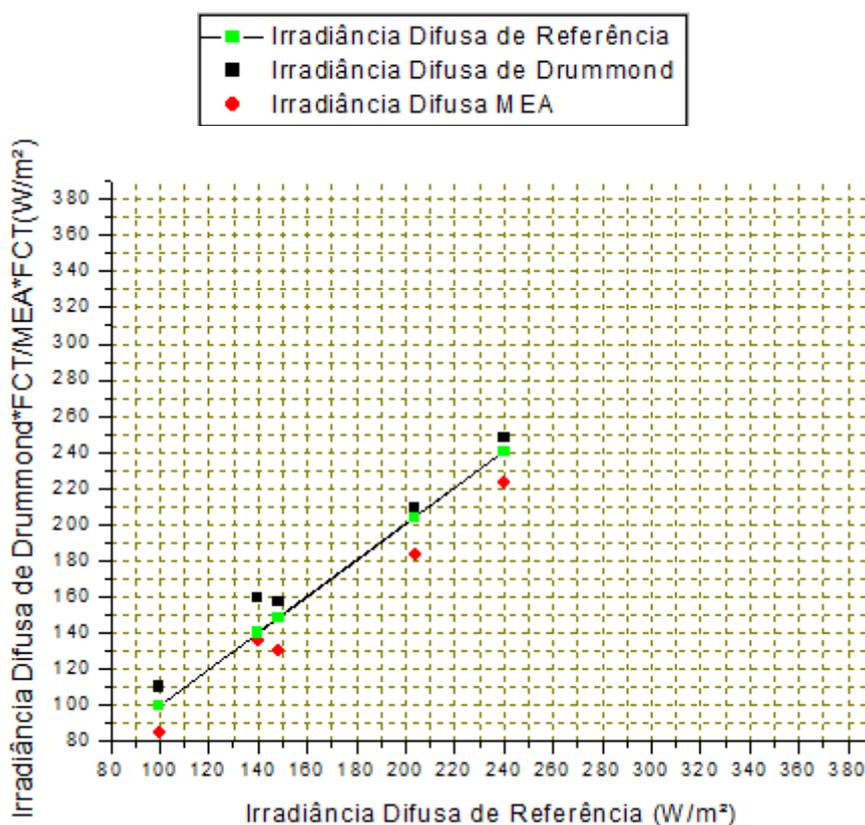


Figura 72 - Valores médios diários de MEA e Drummond versus irradiância difusa de referência 2 (disco de sombreamento)

A irradiância difusa medida pelo dispositivo de Drummond em função da irradiância difusa medida pelo MEA está mostrada nos gráficos da Figura 73 a-b para dois dias representativos: um dia de céu claro e um dia de céu parcialmente nublado (nesta amostra não houve nenhum dia de céu nublado) sendo os dias Julianos 120 (29 de abril de 2012) e 121(30 de abril de 2012), respectivamente. Assim como, nos gráficos da Figura 74 a-b tem-se a comparação entre a irradiância difusa de referência 2 versus a de Drummond como também nos gráficos da Figura 75 a-b a irradiância difusa de referência 2 versus a irradiância difusa MEA para esses mesmos dias representativos.

Observa-se na Figura 73a-b que a comparação entre MEA e Drummond é satisfatória tendo em vista que os coeficientes angulares e os coeficientes de correlação, R^2 , são próximos de um para os dias analisados, além de ter desvios-padrões bem próximos para dias diferentes. Indicando que o MEA tem um comportamento padrão satisfatório em relação ao dispositivo de Drummond para a referência 2 assim como também foi observado para a referência 1.

Já nas Figuras 74a-b e 75a-b, que mostra a comparação entre as irradiâncias difusas referência 2 x Drummond e referência 2 x MEA, respectivamente, se pode notar uma semelhança entre os gráficos das Figuras 74a (referência 2 versus Drummond para dia de céu

claro) e 75a (referência 2 versus MEA para o mesmo dia de céu claro) e das Figuras 74b (referência 2 versus Drummond para dia de céu parcialmente nublado) e 75b (referência 2 versus MEA para o mesmo dia de céu parcialmente nublado). Semelhança esta comprovada pelos valores bem próximos de seus parâmetros: coeficiente angular, coeficiente de correlação e desvio padrão. Sendo os dois primeiros próximos a um denotando boa correlação. Portanto, evidenciando que ambos os equipamentos de Drummond e MEA, expressam medidas comparáveis nas mesmas condições de céu. Conclusão esta também obtida para a referência 1.

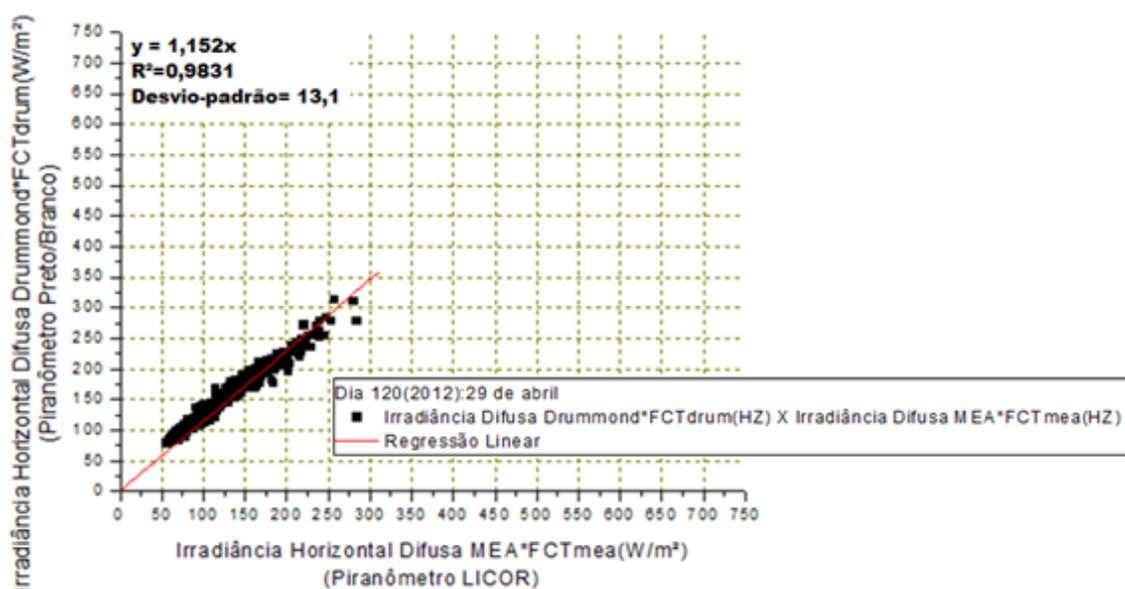


Figura 73 a - Dia de céu claro (29 de abril). MEA x Drummond

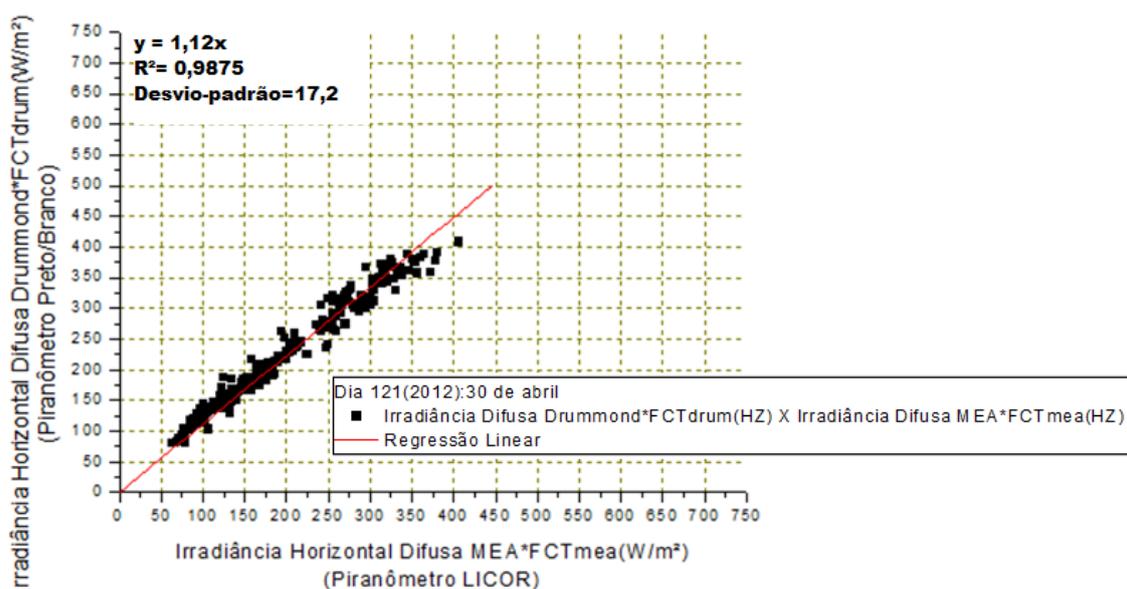


Figura 73 b - Dia de céu parcialmente nublado (30 de abril). MEA x Drummond

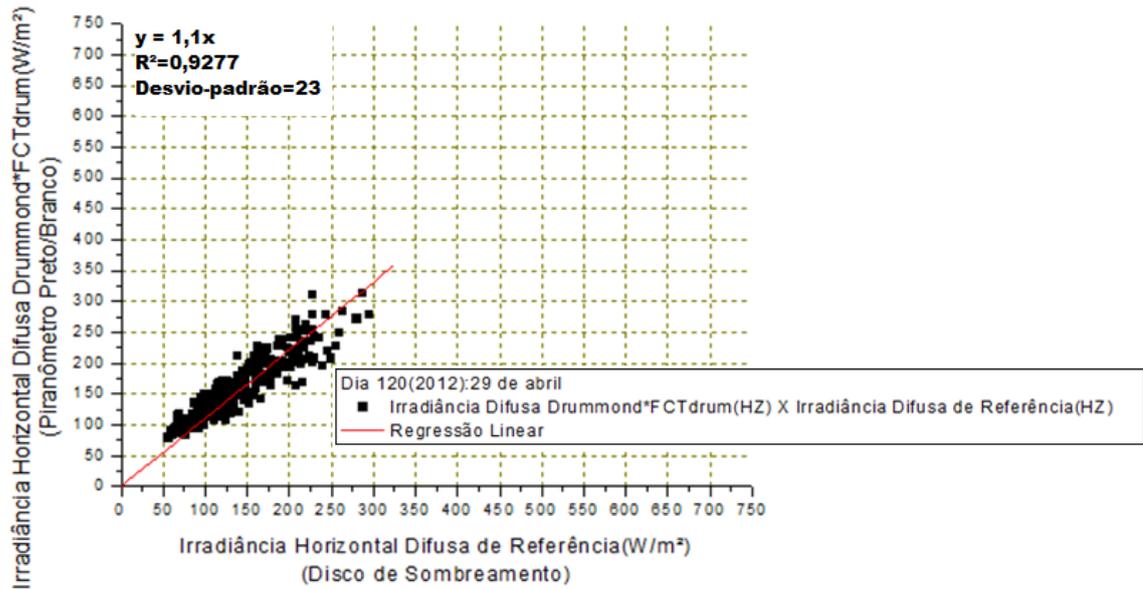


Figura 74 a - Dia de céu claro (29 de abril). Referência 2 x Drummond

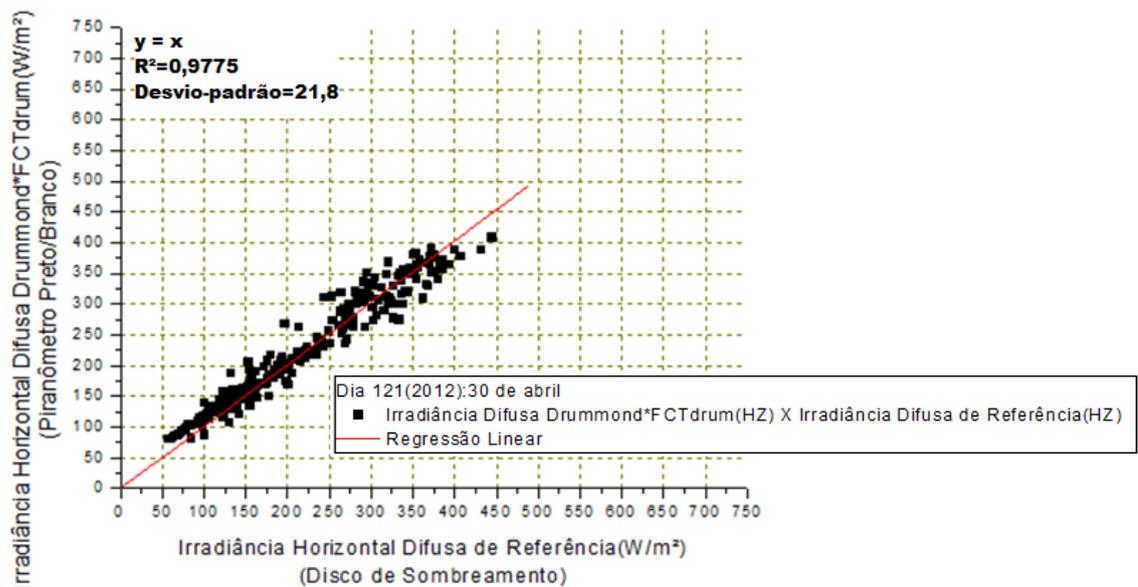


Figura 74 b - Dia de céu parcialmente nublado (30 de abril). Referência 2 x Drummond

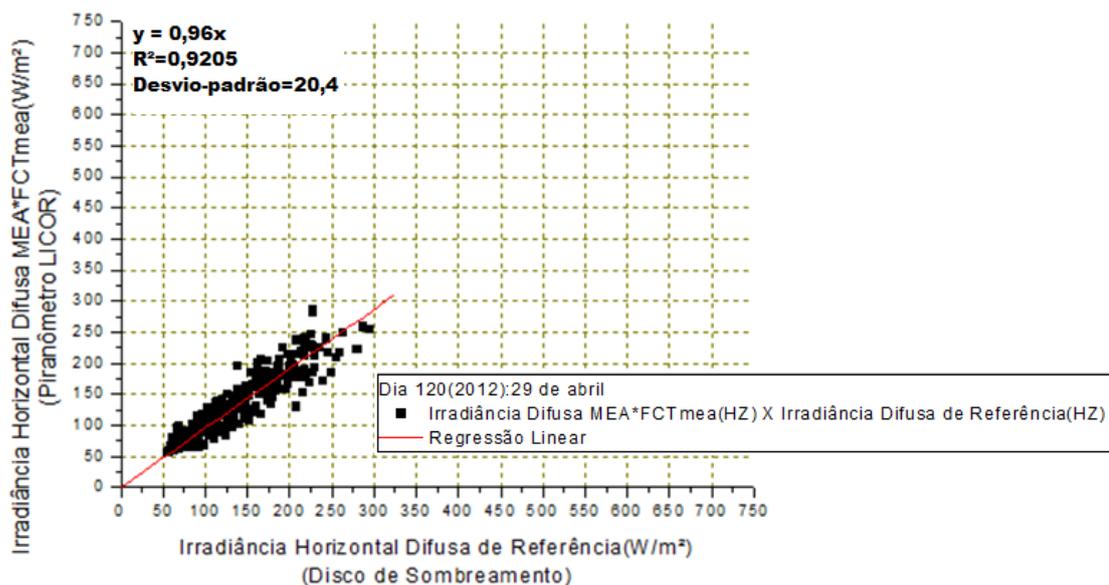


Figura 75 a - Dia de céu claro (29 de abril). Referência 2 x MEA

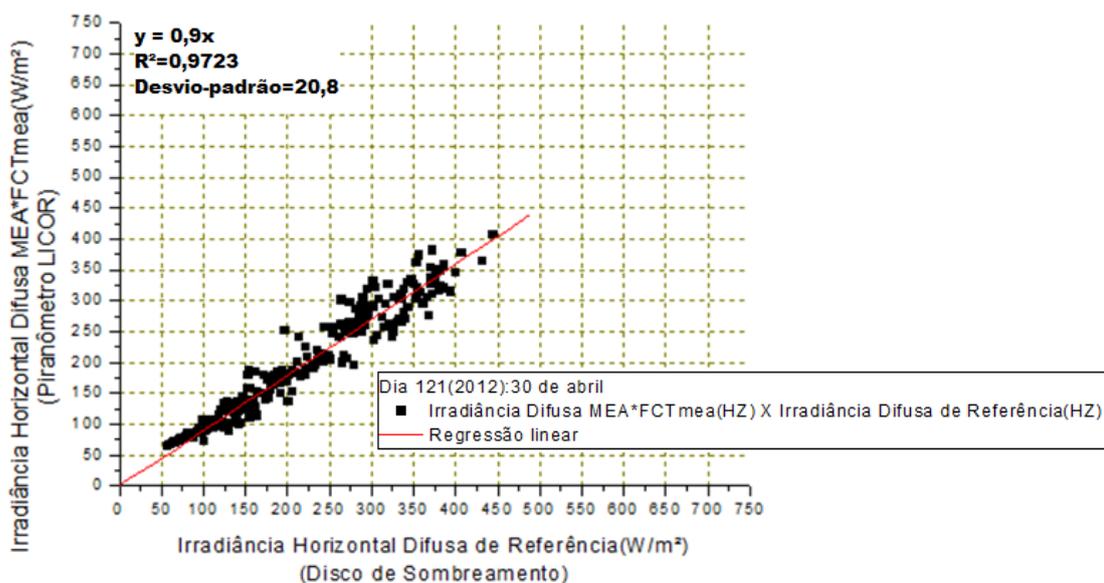


Figura 75 b - Dia de céu parcialmente nublado (30 de abril). Referência 2 x MEA

Um resumo dos resultados das análises estatísticas para os 5 dias baseados na referência 2, entre as irradiâncias difusas de MEA x Drummond, de Drummond x referência 2 e de MEA x referência 2 é mostrado na Tabela 9. As irradiâncias difusas medidas pelos dispositivos de Drummond e MEA foram corrigidas pelos respectivos fatores de correção isotrópicos e anisotrópicos assim como na análise feita com relação à referência 1. Os respectivos gráficos e planilhas dos erros dos dias analisados se encontram no Apêndice B.

Os valores máximos de MBE obtidos nas comparações entre MEA x Drummond, Drummond x referência 2 e MEA x referência 2 são respectivamente, -26 W/m^2 ($-23,58\%$),

25,42 W/m² (18,15%) e -14,03 W/m² (-14,07%). Para RMSE os valores máximos obtidos são respectivamente 26,91 W/m² (24,41%), 35,42 W/m² (25,29%) e 26,65 W/m² (17,96%). Como já foi dito para a referência 1, os valores de MBE e RMSE da comparação entre Drummond x referência encontrados na literatura, como por exemplo, em Kudish e Evseev (2008) e em López *et al.*(2004) possuem valores máximos na ordem de -12% e 18%, respectivamente, mostrando que os resultados de desempenho do MEA continuam equiparáveis aos resultados encontrados na literatura, também para a base de dados baseados na comparação com o disco de sombreamento (referência 2).

Tabela 9 – MEA x Drummond, Drummond x Referência 2 e MEA x Referência 2

Irradiâncias Difusas MEA x Drummond				
Dia do Ano	n	Kt	RMSE(W/m ²)*	MBE(W/m ²)*
27/04/2012	118	0,64	(35,48)(22,5%)	(-33,05)(-20,96%)
28/04/2012	119	0,61	(39,93)(16,09%)	(-32,93)(-13,27%)
29/04/2012	120	0,66	(28,63)(17,96%)	(-26,1)(-16,37%)
30/04/2012	121	0,57	(32,72)(15,6%)	(-29,17)(-13,91%)
01/05/2012	122	0,64	(26,91)(24,41%)	(-26)(-23,58%)
Irradiâncias Difusas Drummond x Referência 2				
Dia do Ano	n	Kt	RMSE(W/m ²)**	MBE(W/m ²)**
27/04/2012	118	0,64	(32,66)(22,01%)	(18,61)(12,54%)
28/04/2012	119	0,61	(20,5)(8,54%)	(9,82)(4,09%)
29/04/2012	120	0,66	(35,42)(25,29%)	(25,42)(18,15%)
30/04/2012	121	0,57	(27,45)(13,47%)	(12,59)(6,18%)
01/05/2012	122	0,64	(17,68)(17,73%)	(12,62)(12,65%)
Irradiâncias Difusas MEA x Referência 2				
Dia do Ano	n	Kt	RMSE(W/m ²)**	MBE(W/m ²)**
27/04/2012	118	0,64	(26,65)(17,96%)	(-17,15)(-11,56%)
28/04/2012	119	0,61	(35,13)(14,63%)	(-23,53)(-9,8%)
29/04/2012	120	0,66	(20,31)(14,5%)	(-2,24)(-1,6%)
30/04/2012	121	0,57	(27,26)(13,38%)	(-18,17)(-8,92%)
01/05/2012	122	0,64	(17,65)(17,7%)	(-14,03)(-14,07%)

*RMSE/MBE são percentagens aplicadas sobre o valor médio diário de Idifusa, Drummond dados na Tabela 8;

**RMSE/MBE são percentagens aplicadas sobre o valor médio diário de Idifusa, referência dados na Tabela 8.

As Figuras 76 e 78 mostram os gráficos da irradiância solar global, direta, difusa de referência 2, difusa de Drummond e difusa MEA para os dois dias representativos 120 (29 de abril de 2012) e 121(30 de abril de 2012) respectivamente, em Recife. Já as Figuras 77 e 79 mostram os gráficos da irradiância solar difusa de referência 2, Drummond e MEA em destaque para os dias representativos. Pode-se retirar desses gráficos as mesmas conclusões obtidas para a amostra de dados baseadas na referência 1, isto é, as flutuações da irradiância difusa obtidas pelo MEA acompanham satisfatoriamente as flutuações da irradiância difusa de referência 2 e do dispositivo de Drummond, ao longo do dia.

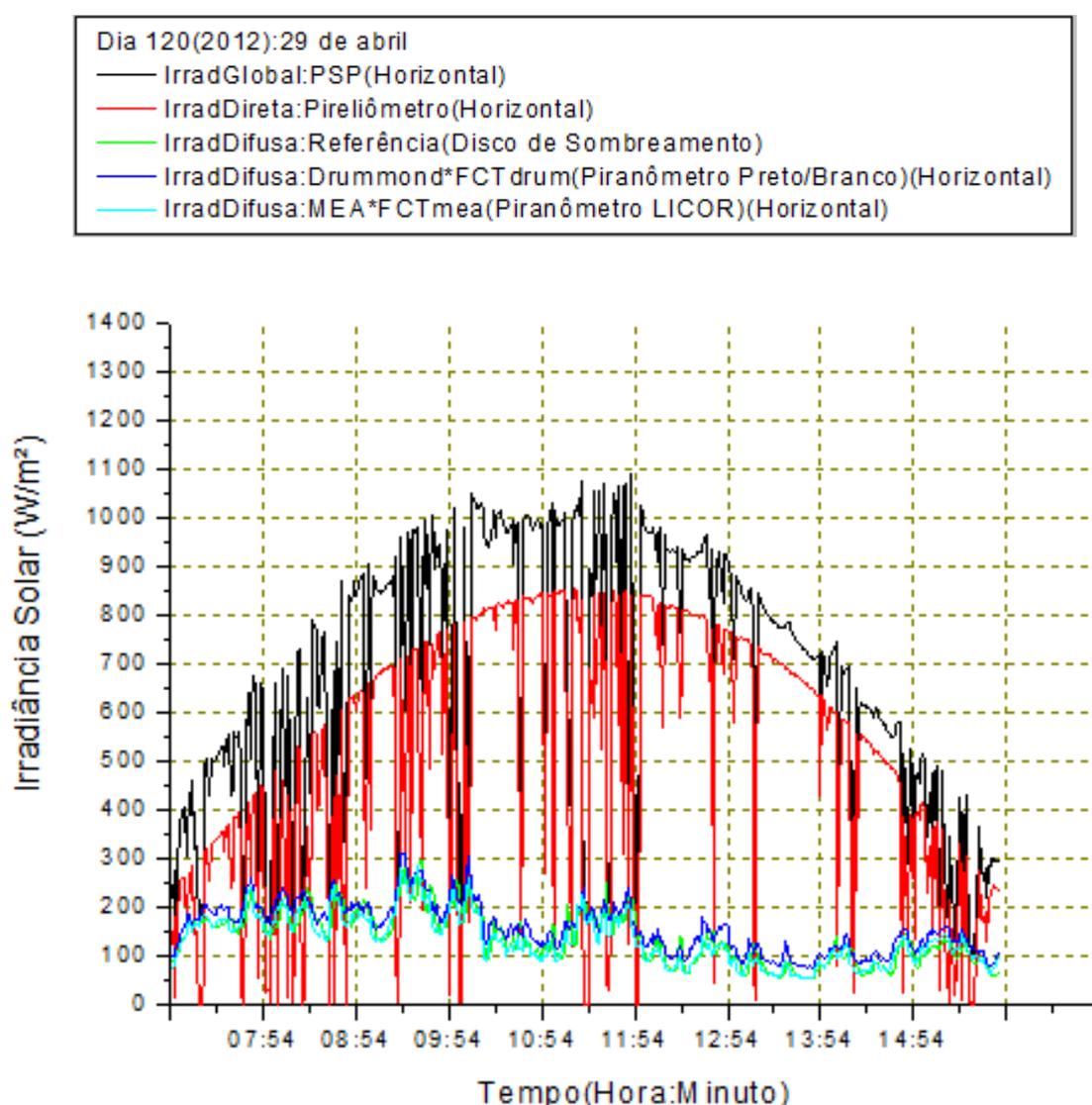


Figura 76 – Irradiância global, direta, difusas de referência 2, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, disco de sombreamento, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 29/04/2012

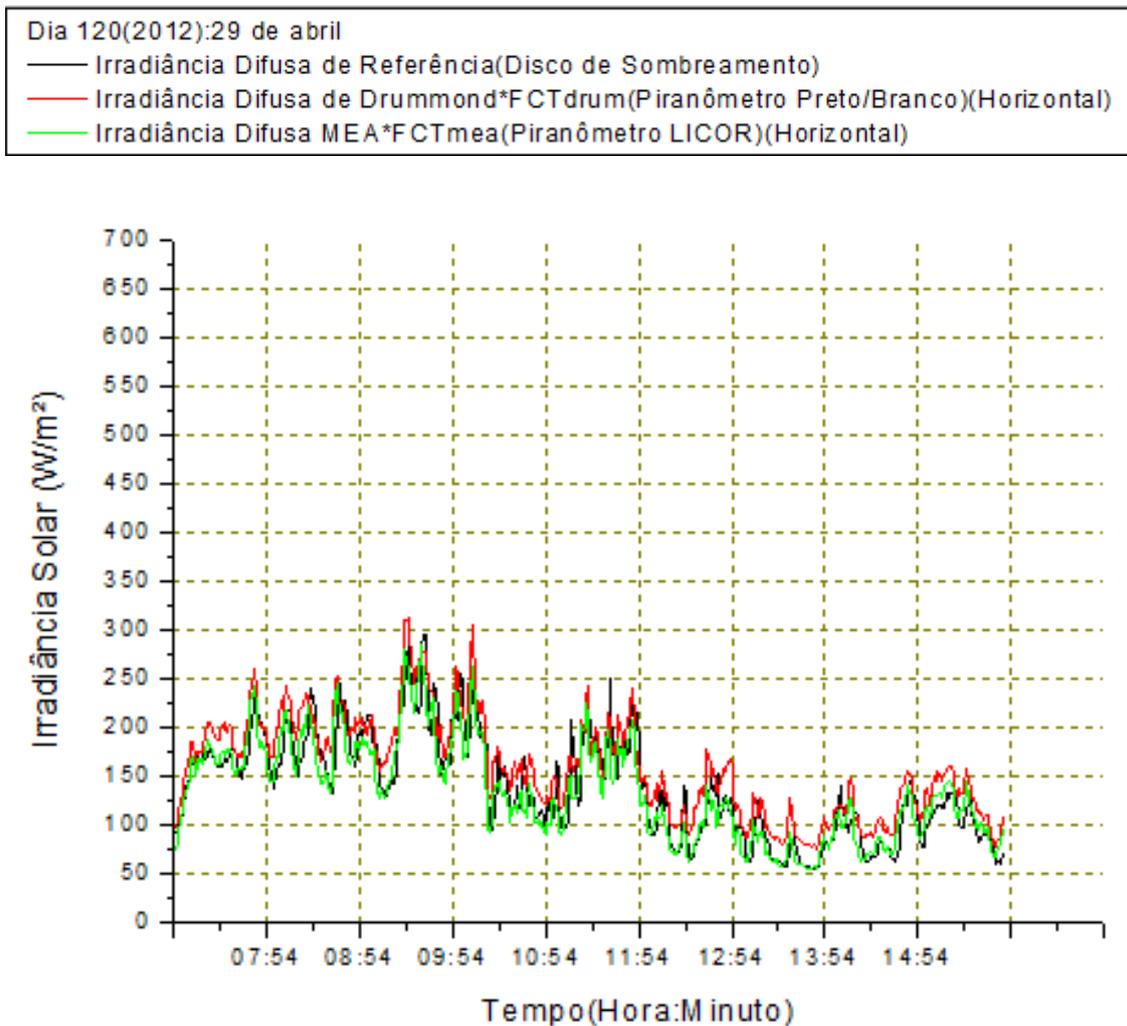


Figura 77 – Irradiância difusa de referência 2, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 29/04/2012

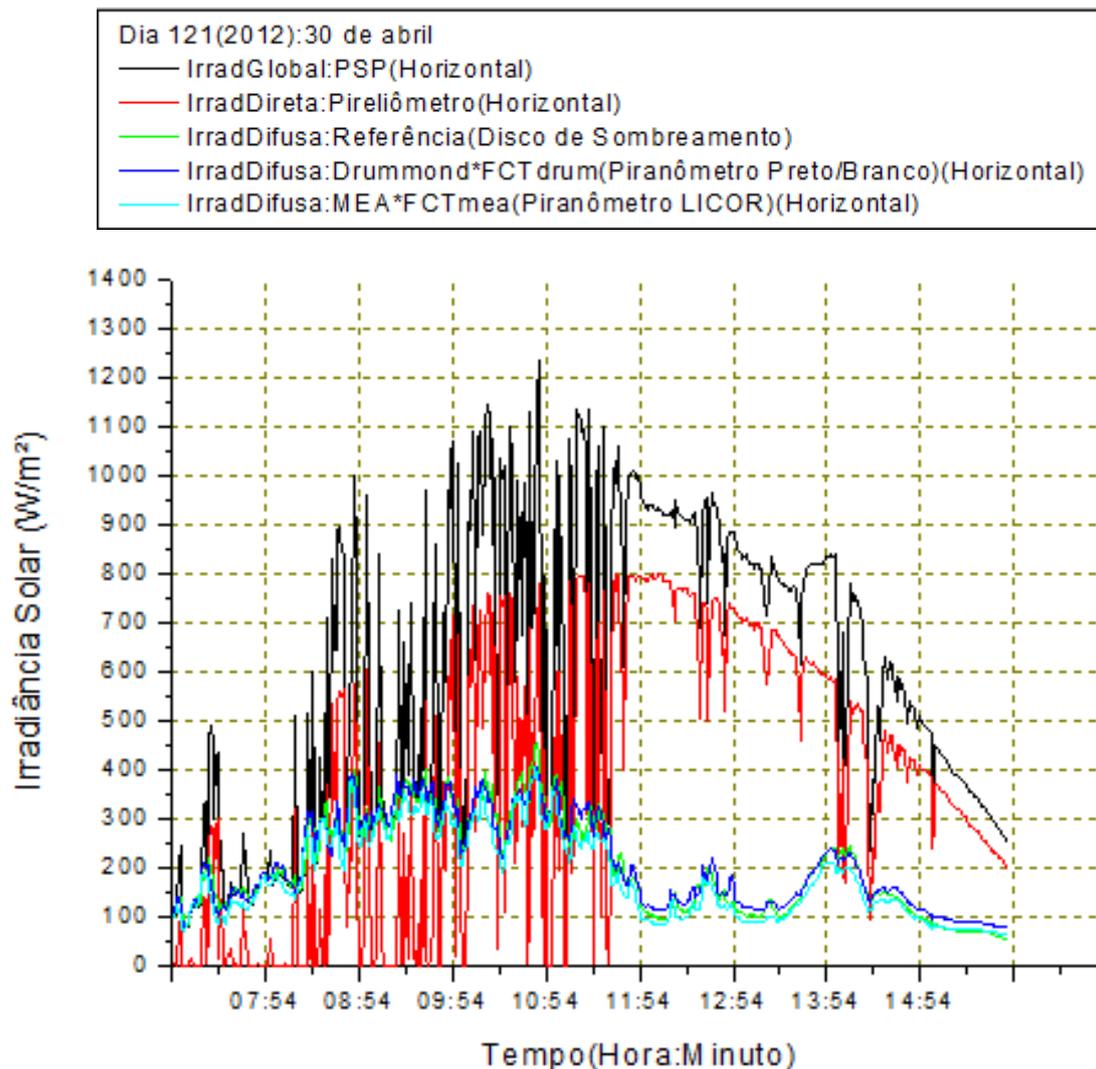


Figura 78 – Irradiância global, direta, difusas de referência 2, de Drummond e MEA medidas respectivamente pelo PSP, pireliômetro, disco de sombreamento, dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen e dispositivo MEA, em Recife, no dia 30/04/2012

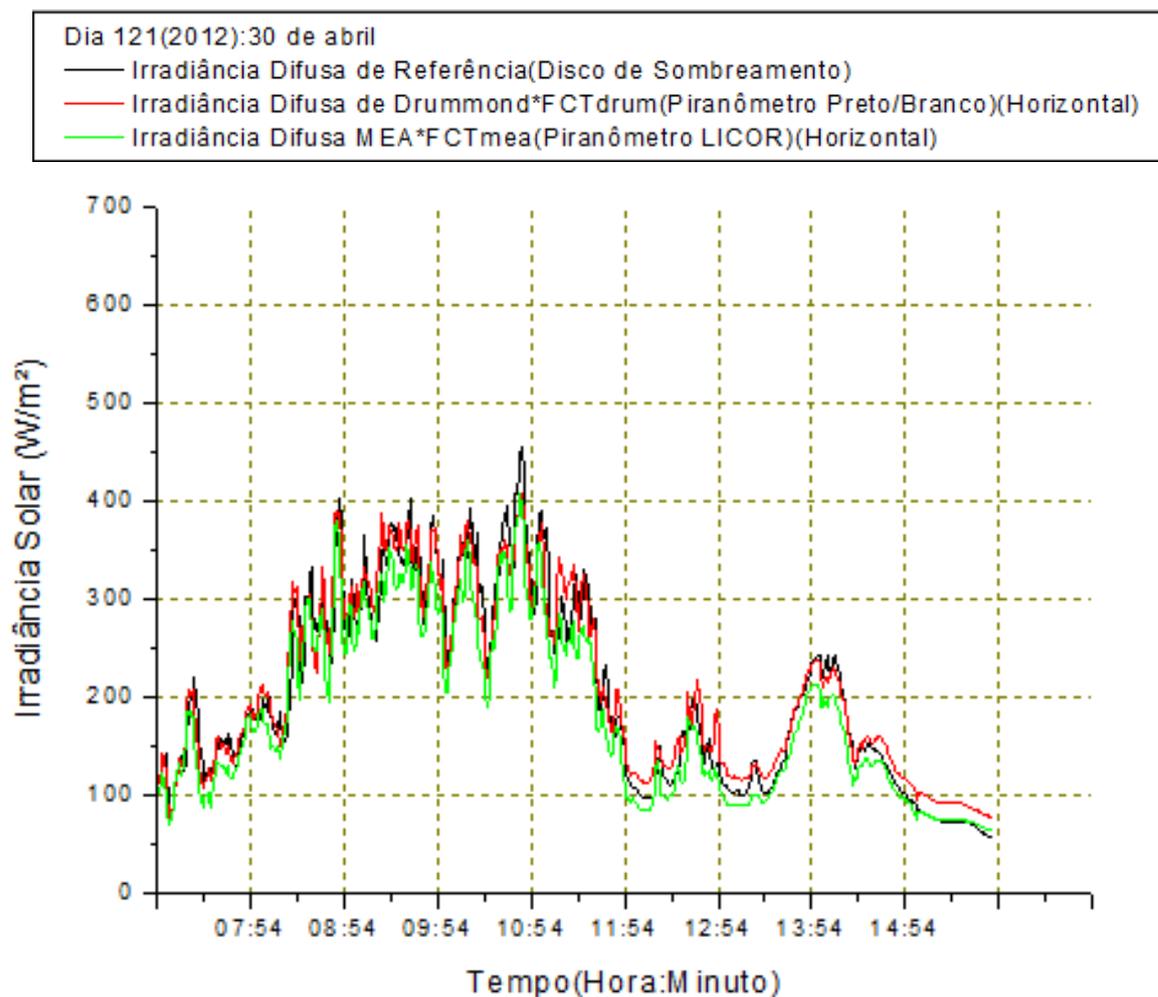


Figura 79 – Irradiância difusa de referência 2, de Drummond e MEA em destaque, em Recife, no dia 30/04/2012

5.2 Custo de fabricação do MEA

O custo da montagem do anel de sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA) sem considerar o custo dos dois piranômetros LI-COR (US\$ 300,00 cada, aproximadamente) e do “datalogger” (US\$ 5.000,00 aproximadamente) é apresentado na tabela abaixo:

Tabela 10 – Custo de fabricação do MEA

Itens	Custo (R\$)
Estrutura mecânica com serviço	1050,00
Galvanização	
Parafuso-sem-fim 16mm 1m inoxidável	
Barra de Alumínio (3”)	
Tinta (preto fosco) 350 ml	
Transferidor de ângulo	
Motor Bosch	
CLP-PIC	
Sensor (LDRs)	
LDR (2)	
Chave-fim-de-curso (2)	
Fonte 12V 500 mA	
Caixa plástica para proteção	30,00
Total	1580,00

Ainda há o custo da bateria, do controlador de carga e do painel fotovoltaico, mas estes são itens opcionais, necessários apenas para ambientes remotos, podendo-se alimentar todo o sistema com uma fonte ligada à rede elétrica.

6. *CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES*

1. Foi desenvolvido um equipamento para medição da irradiância solar difusa cujo custo é da ordem de metade do equipamento mais barato existente no mercado internacional. Considerando os encargos de importação essa relação poderá passar para 1/5;
2. Adicionalmente o MEA tem a vantagem de ser automatizado o que prescinde da operação manual do equipamento concorrente;
3. O Anel de Sombreamento de Melo-Escobedo Automatizado (MEA) registrou desvios máximos na ordem de -17,69% e 22,98% (referência 1) e -14,07% e 17,96% (referência 2), respectivamente para MBE e RMSE. O Anel de Sombreamento de Drummond da Kipp Zonen registrou desvios máximos na ordem de -10,8% e 18,02% (referência 1) e 18,15% e 25,29% (referência 2), respectivamente para MBE e RMSE. Os valores de MBE e RMSE da comparação entre o Anel de Sombreamento de Drummond versus a irradiância difusa de referência citados na literatura possuem valores máximos na ordem de -12% e 18%, respectivamente, mostrando que os resultados obtidos pelo MEA foram equiparáveis. Como a referência 2, disco de sombreamento, é mais precisa também pode ser observado que o MEA mostrou-se superior, para as amostras consideradas, ao Anel de Sombreamento de Drummond da Kipp Zonen;
4. O equipamento MEA ainda não se encontra em seu estado ideal: existe um espaço muito grande para introdução de pequenos ajustes que propiciarão uma precisão ainda maior, ajustes estes listados a seguir:
 - A. A banda de sombra do MEA foi construída com 3 polegadas enquanto que o dispositivo de Drummond da Kipp & Zonen possui aproximadamente 2 polegadas, fazendo com que o MEA tenha um erro maior em suas medidas da irradiância difusa; portanto, já que o diâmetro de um piranômetro LICOR é de 2,38 cm, pode-se reconstruir a banda de sombra com 1 polegada (2,54 cm) atendendo ainda ao requisito da largura mínima de sombra W citado na Seção 4.1.1 e fazendo uso de fotosensores com menor diâmetro que os atuais, 0,9 cm;
 - B. “O efeito da anisotropia certamente afeta as medidas da irradiância solar difusa em dispositivos com anéis de sombreamento” (OLIVEIRA et

al.,2002,p.701). Como o campo da irradiância solar difusa não é isotrópico, se o detector do MEA não estiver perfeitamente centralizado debaixo da sombra do anel, isso pode ser causa de erro caso o dispositivo de Drummond esteja com seu piranômetro centralizado no mesmo instante, ao se comparar a medida dos instrumentos. E de fato essa é uma melhoria que deve ser aplicada ao MEA, pois o sistema ainda permite que o sol alcance a borda do piranômetro aumentando assim a proximidade do sensor com o raio do sol, sem chegar, porém, a sofrer incidência direta, pois o piranômetro ainda se encontra dentro da faixa sombreada, como é mostrado na fotografia das Figuras 46 e 57-b;

- C. Substituir o piranômetro LI-COR usado no MEA na medida em que tem uma incerteza de medição de 10% contra 5% de incerteza no piranômetro preto e branco usado no dispositivo de Drummond da Kipp&Zonen; ou se fazer uma calibração contrastante entre os instrumentos;
- D. Utilizar sensores idênticos, pois o tempo de resposta entre o piranômetro LI-COR (Fotodiodo) e o piranômetro preto e branco (Termopilha) e o piranômetro PSP são bastante diferentes;
- E. Utilizar o critério para o ângulo zenital menor ou igual a 60° para mitigar o efeito cosseno entre os instrumentos;
- F. A construção de um anel ao invés de um arco de anel que pode causar uma distorção geométrica na forma circular da banda de sombra. O fator de correção (F_C) determinado analiticamente foi baseado nessa premissa.

5. Como proposta de continuidade deste trabalho, são dadas as seguintes sugestões:

- a. O SkyImager é um equipamento que mede a cobertura de nuvens no céu através de uma câmera voltada para o céu mas que deve ter sua objetiva constantemente sombreada. O equipamento desenvolvido neste trabalho pode também ser usado para este tipo de aplicação apenas trocando o piranômetro pela câmera;
- b. Transformar a banda de sombra em um disco sombreador automatizado;
- c. Introduzir as modificações sugeridas nas conclusões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATLLES,F.J.,OLMO,F.J. e ALADOS-ARBOLEDAS,L.1995:**On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements.** Sol.Energy,54,105-114.
- COLLARES PEREIRA, M.; RABL, A. **The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values**, Solar Energy, 22(2), 155-164, 1979.
- DAL PAI, A; ESCOBEDO,J.F. **Série temporal diária média horária e anual média mensal diária da irradiação solar difusa anisotrópica.** Energ. Agric.,Botucatu, vol.21,n.2,2006,p-1-15.
- DAL PAI,A.;ESCOBEDO,J.F. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa.** Energia na Agricultura - FCA/UNESP – Botucatu-SP – Brasil, 2005.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, Willian A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** 2nd ed. A Wiley-Interscience Publication. JOHN WILEY & SONS, INC., 1991. 10 p.
- FRAIDENRAICH, Naum; LYRA, Francisco. **Energia Solar: fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica.** Ed. Universitária da UFPE, Recife, PE, Brasil, 1995.471p. ISBN 85-7315-024-6
- KING, David L.; BOYSON, William E.; HANSEN Barry R.; BOWER Ward I., **Improved Accuracy for low-cost solar irradiance sensors** – Sandia National Laboratories – Albuquerque, New Mexico, USA (1998). Disponível em: <<http://www.sandia.gov/pv/>>

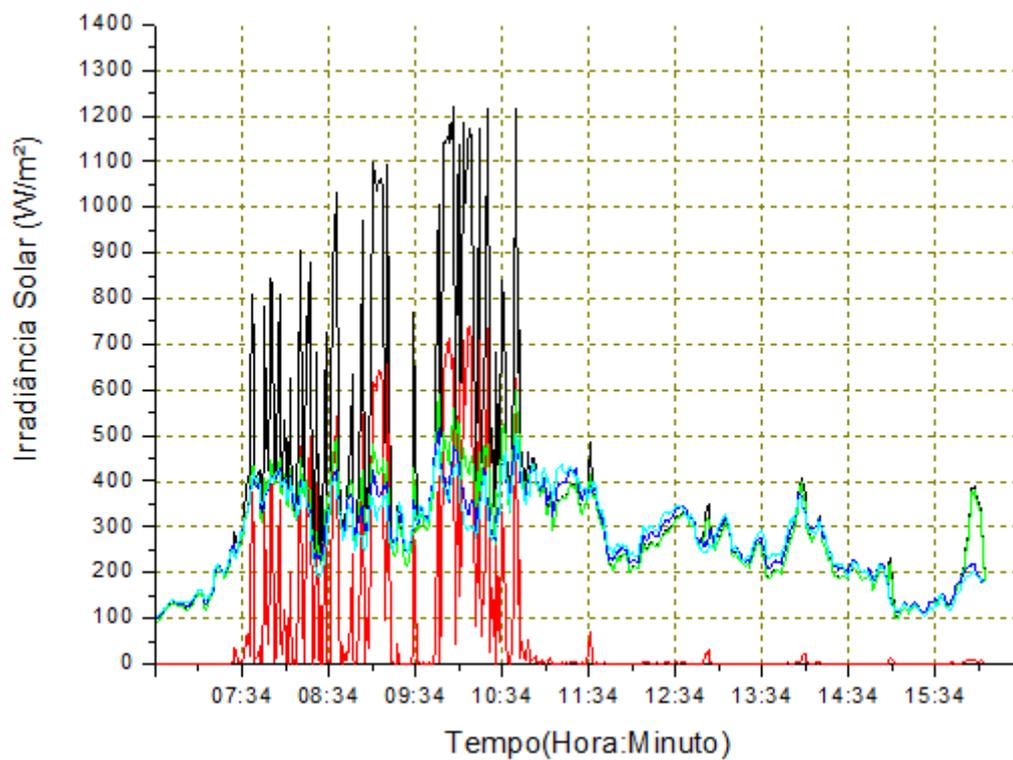
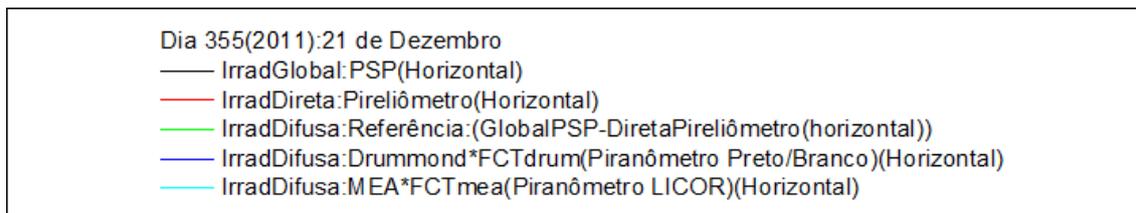
- KUDISH,A.I., EVSEEV,E.G.2008: **The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel.** Solar Energy 82,144-156, 2008.
- LÓPEZ,G.,MUNEER,T.,CLAYWELL,R. **Assessment of four shadow band correction models using beam normal irradiance data from the United Kingdom and Israel.** Energy Conversion and Management 45 (2004) 1963-1979.
- MELO, J. M. D., 1993: **Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta** (in Portuguese). Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP-Botucatu-SP-Brasil, 130 pp.
- NATIONAL GEOGRAPHIC BRASIL Johnson, G. **Plugados no Sol. O Poder do Sol: como podemos usar essa fonte de energia limpa e inesgotável.** Brasil. Ano 10. Nº 114. p. 76-95. Setembro 2009.
- OLIVEIRA, A. P.; MACHADO A. J.; ESCOBEDO, J. F. **A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at the surface.** Journal of Atmospheric and oceanic technology, São Paulo, 2002.Vol. 19.
- SIQUEIRA, ADALBERTO NUNES DE. **Geração sintética da irradiação solar diária no Brasil para aplicações energéticas.** Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2008.
- TIBA, CHIGUERU. **O Recurso solar no Brasil: dados Terrestres,** Ed. Universitária da UFPE, Recife, PE, Brasil, 2000.

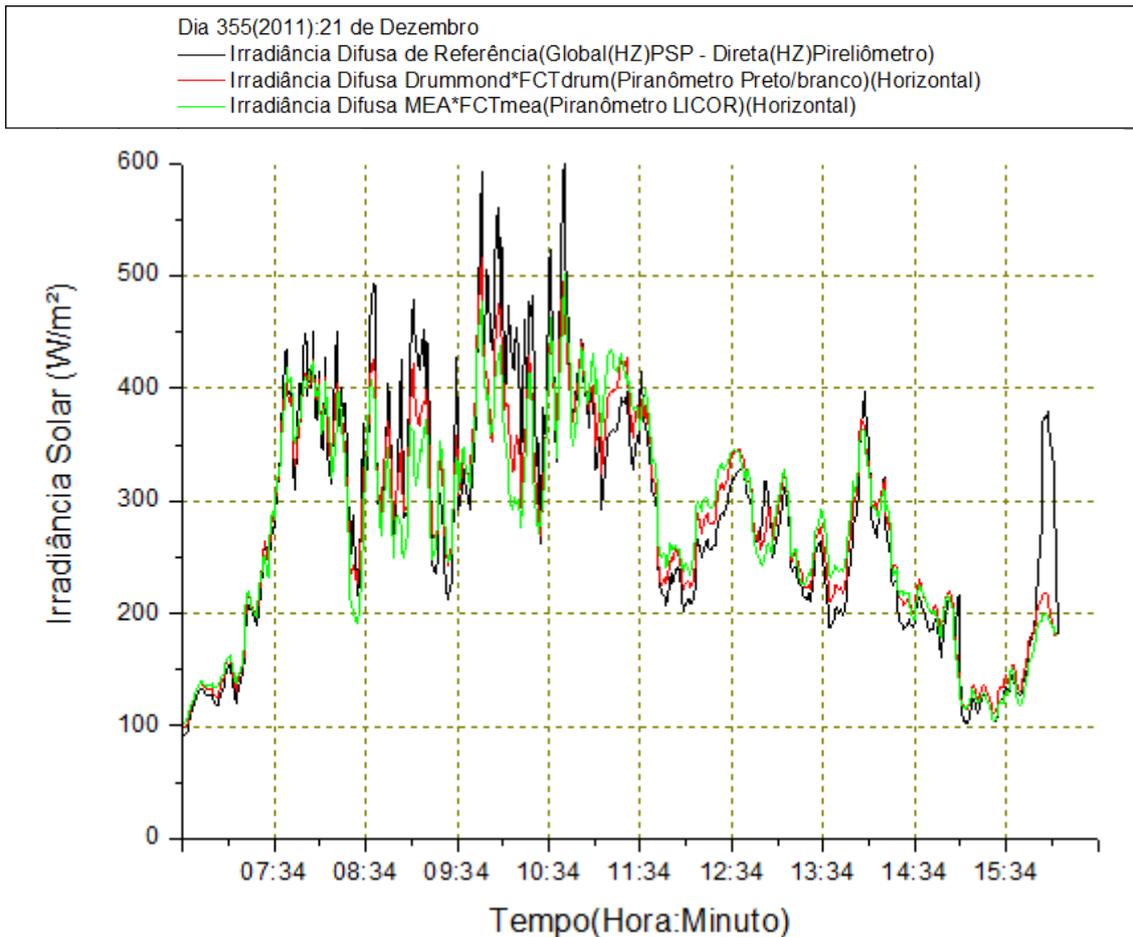
TIBA, CHIGUERU e BELTRÃO, Ricardo E.A. (2012). **Siting PV plant focusing on the effect of local climatic variables on electric energy production – Case study for Araripina e Recife**, Renewable Energy, Aceito para publicação.

VARTIAINEN,E. **An anisotropic shadow ring correction method for the horizontal diffuse irradiance measurements**. Renewable Energy 17, 311-317, 1999.

APÊNDICE A – Dados coletados com relação à referência 1 – Associação de um piranômetro e um pireliômetro

Dia Juliano 355: 21 de dezembro de 2011

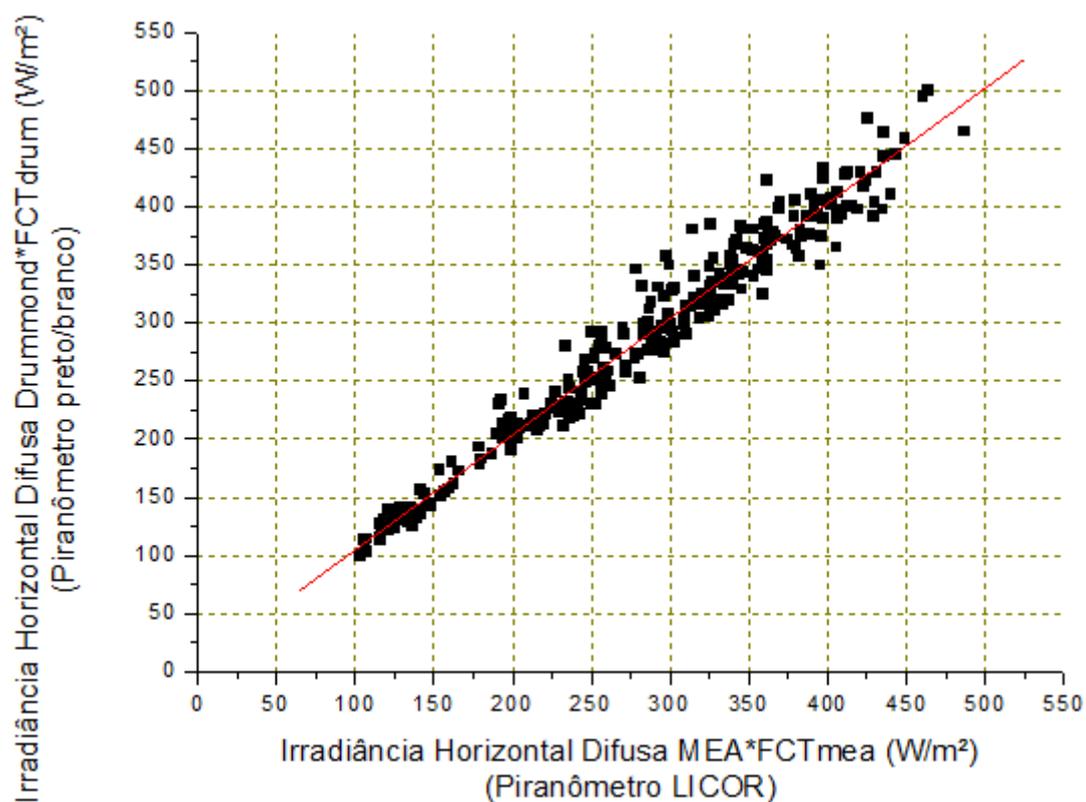




Dia 355: 21 de dezembro de 2011			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,34	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	1,097	X	1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,16	X	1,045
FC Isotrópico			
FC Anisotrópico			
			= 1,13
			= 1,21
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	359,11 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	72,91 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	286,2 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	283,64 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	280,47 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)	MBE(W/m ²)	
I _d fusa(MEA)*FCTmea X I _d fusa(Drummond)*FCTdrum	17,25(6,08%)	(-2,81)(-0,99%)	
I _d fusa(Drummond)*FCTdrum X I _d fusa(Referência)	29,05(10,15%)	3,55(1,24%)	
I _d fusa(MEA)*FCTmea X I _d fusa(Referência)	39,18(13,69%)	1,52(0,53%)	

Dia 355(2011):21 de Dezembro

- Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear

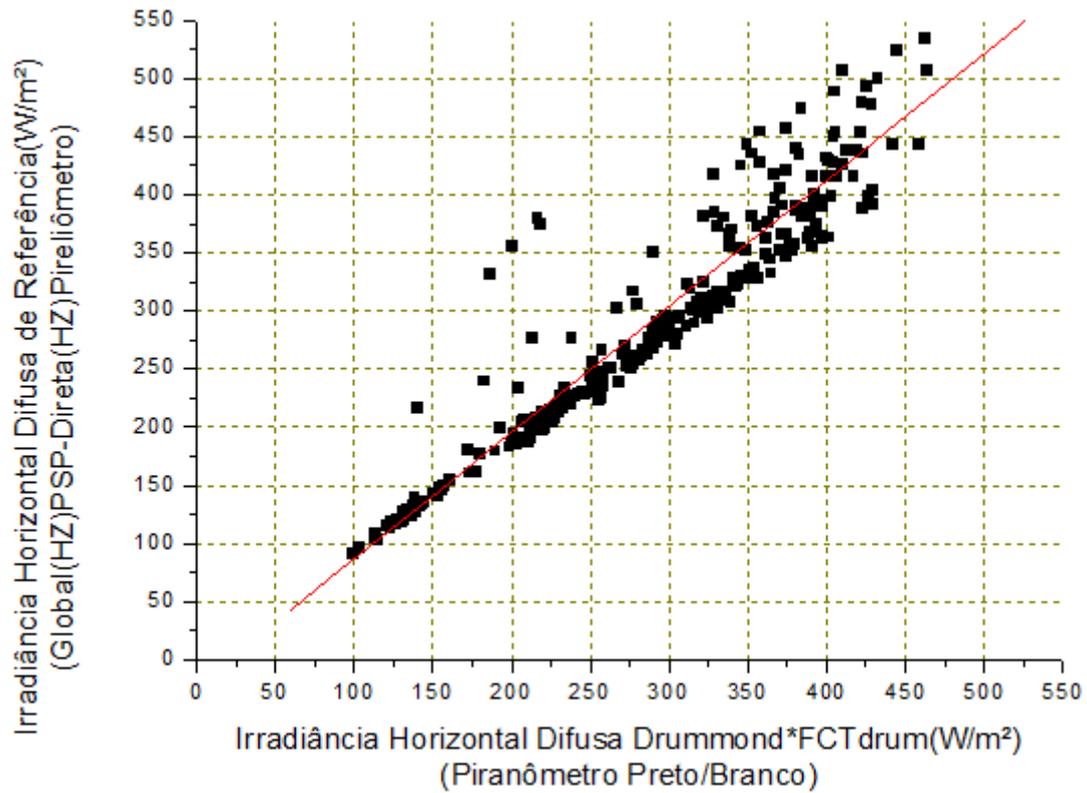


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	5,60941	2,40923	
B	0,9913	0,00816	
R	SD	N	P
0,98119	18,12907	574	<0.0001

Dia 355(2011):21 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

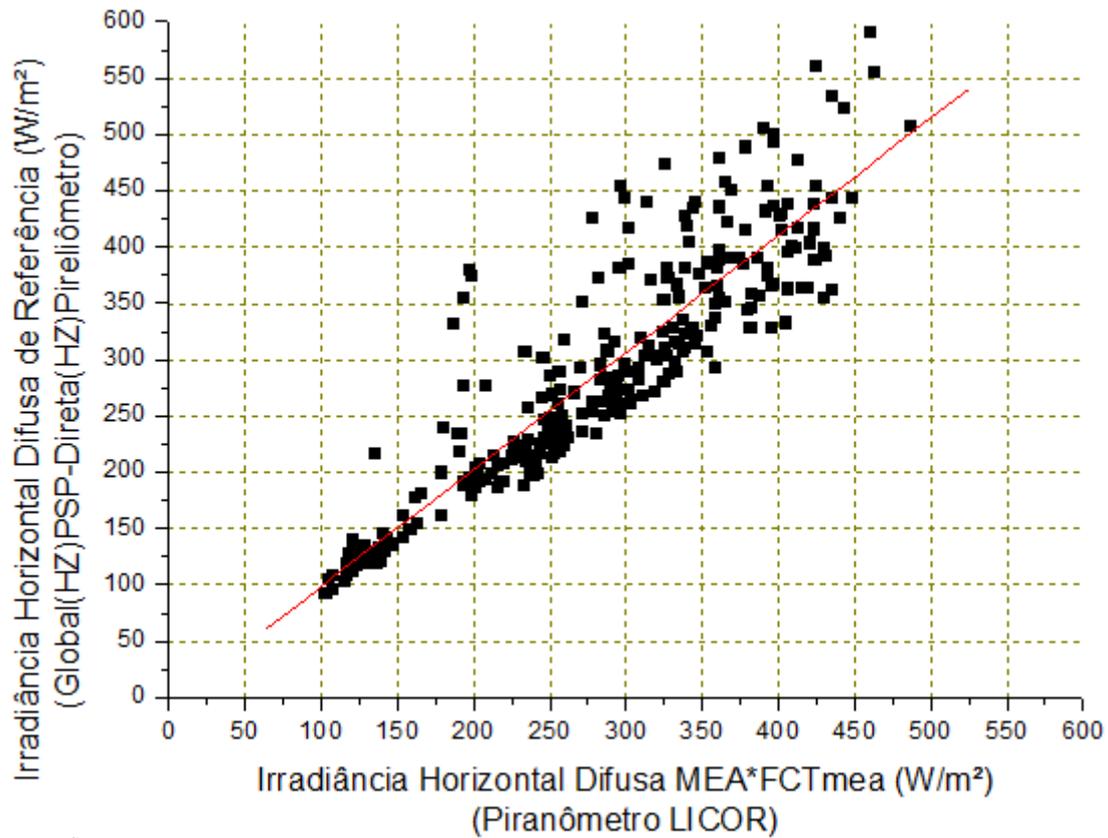


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Ualue	Error		
A	-21,91593	4,56946		
B	1,08628	0,0153		
R	SD	N	P	
0,9477	34,35403	574	<0.0001	

Dia 355(2011):21 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear



$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	-5,3683	6,30304	
B	1,03956	0,02134	
R	SD	N	P
0,89769	47,4294	574	<0.0001

Dia Juliano 358: 24 de dezembro de 2011

Dia 358(2011):24 de Dezembro

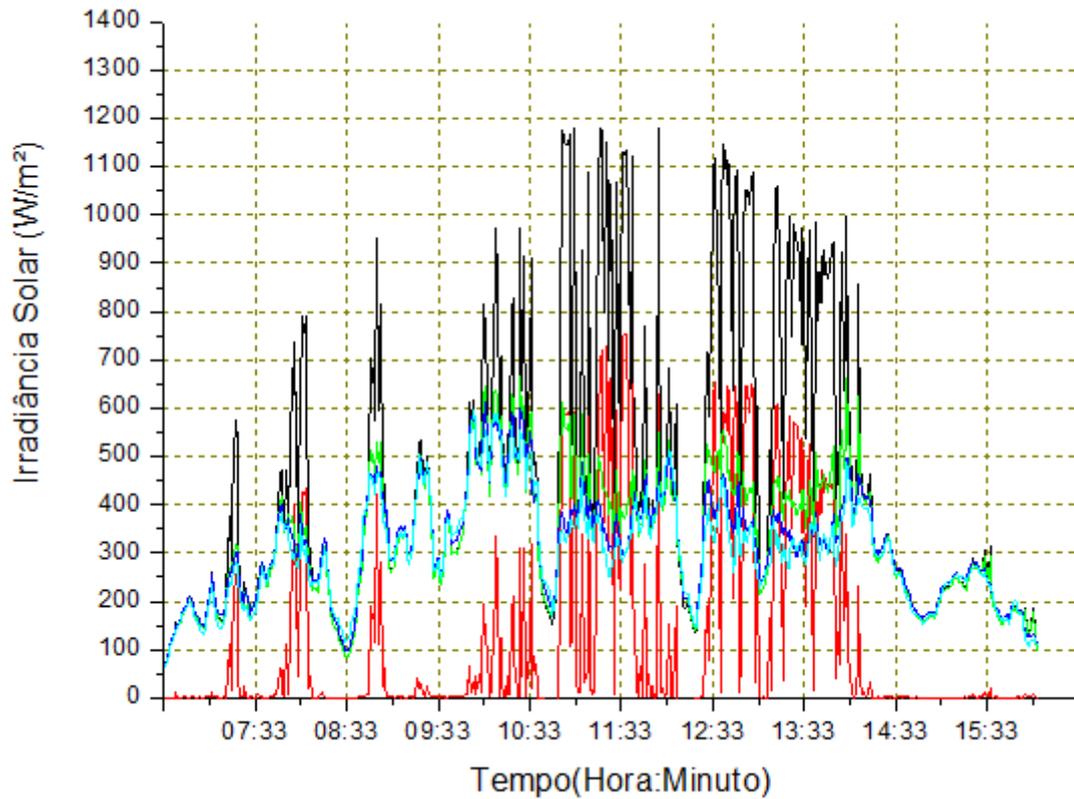
— IrradGlobal:PSP(Horizontal)

— IrradDireta:Pireliômetro(Horizontal)

— IrradDifusa:Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)

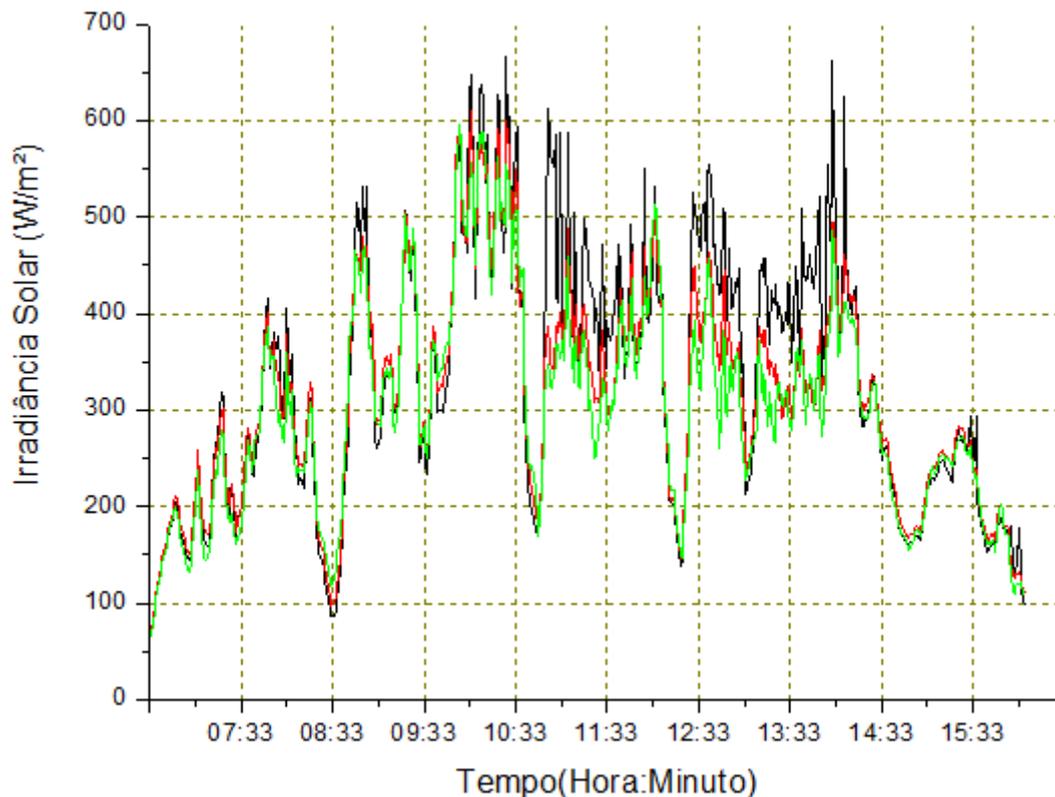
— IrradDifusa:Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

— IrradDifusa:MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 358(2011):24 de Dezembro

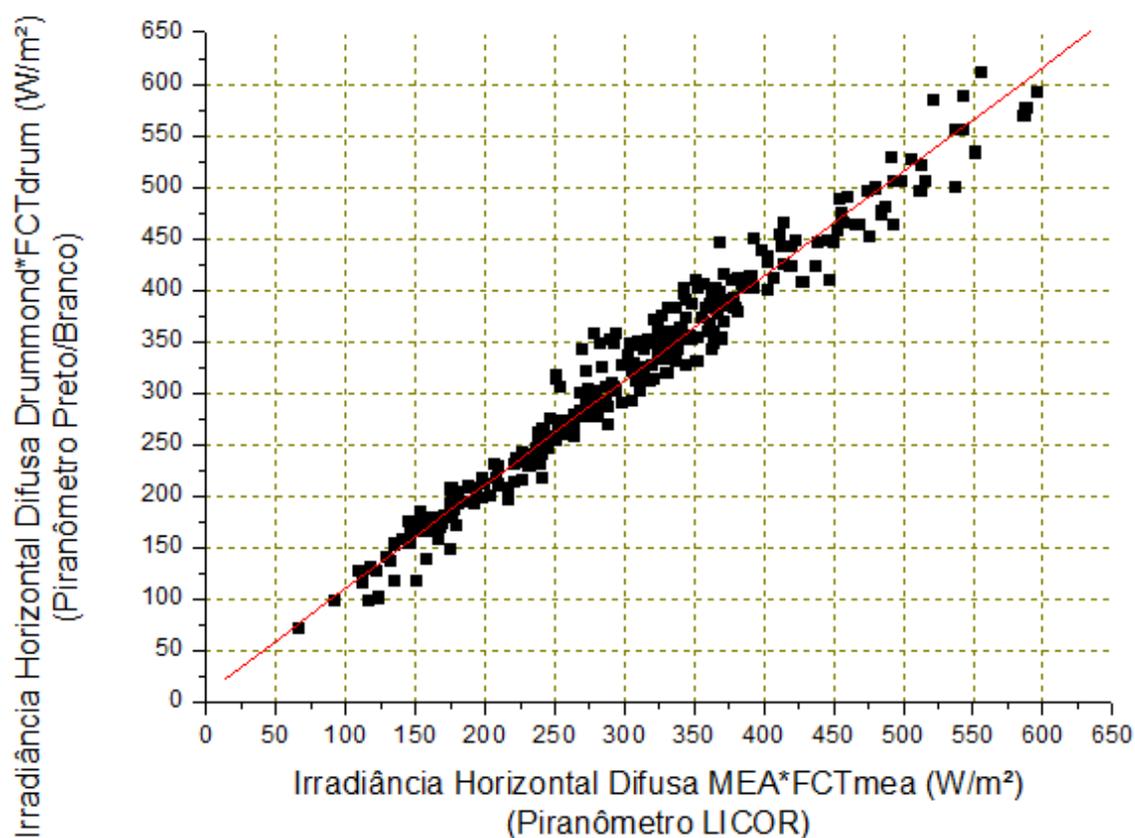
— Irradiância Difusa de Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
 — Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
 — Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 358: 24 de dezembro de 2011			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,41	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,097	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,16	X	1,045
			= 1,13
			= 1,21
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	444,81 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	115,21 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	329,6 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	313,73 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	301,22 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
I _{difusa} (MEA)*FCTmea X I _{difusa} (Drummond)*FCTdrum	23,78(7,58%)		(-11,7)(-3,73%)
I _{difusa} (Drummond)*FCTdrum X I _{difusa} (Referência)	36,16(10,97%)		(-6,79)(-2,06%)
I _{difusa} (MEA)*FCTmea X I _{difusa} (Referência)	49,7(15,08%)		(-18)(-5,46%)

Dia 358(2011):24 de Dezembro

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

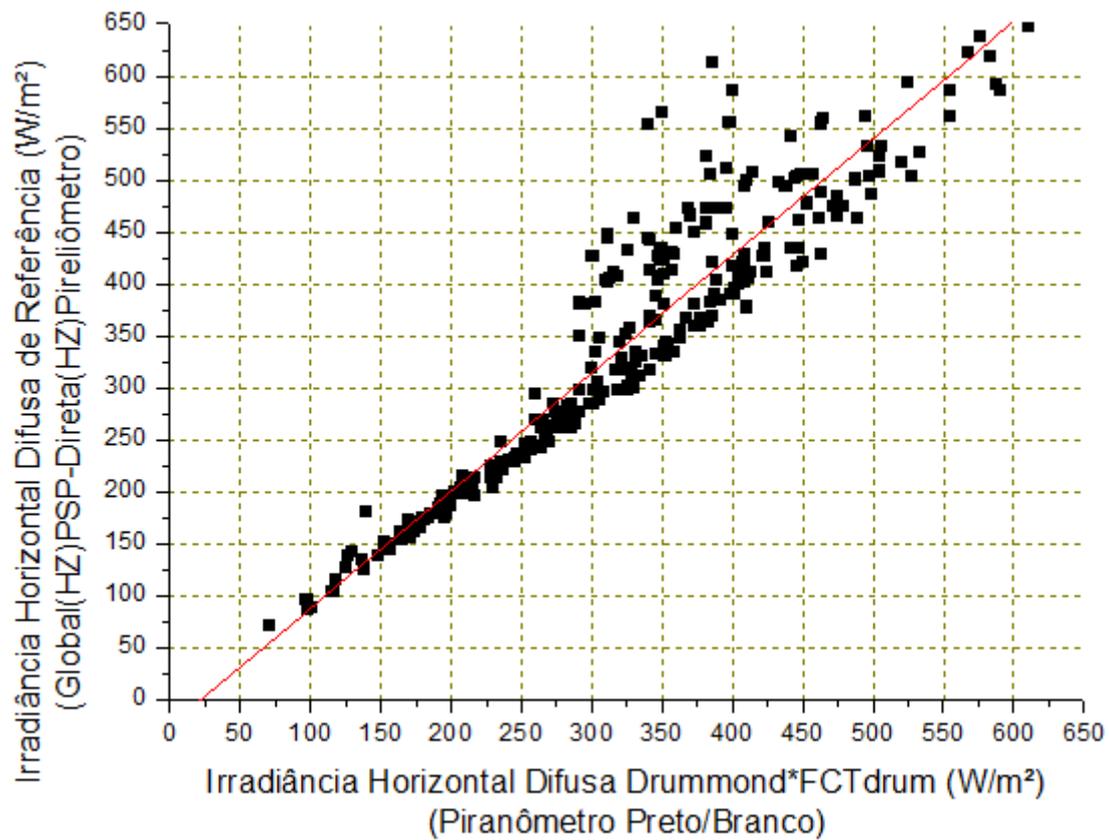


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	8,99773	2,45191		
B	1,01166	0,00766		
R	SD	N	P	
0,98399	19,83777	574	<0.0001	

Dia 358(2011):24 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

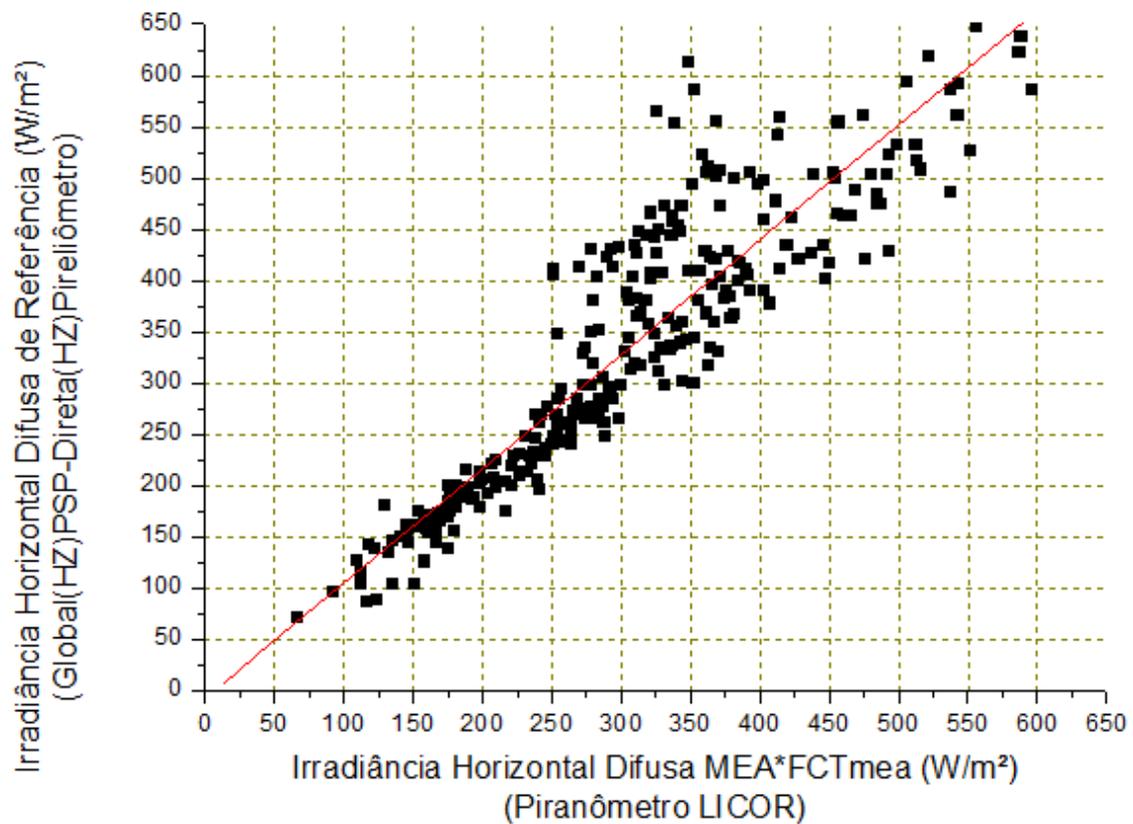


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	-24,53146	5,48621	
B	1,1288	0,01648	
R	SD	N	P
0,94408	43,88011	574	<0.0001

Dia 358(2011):24 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear

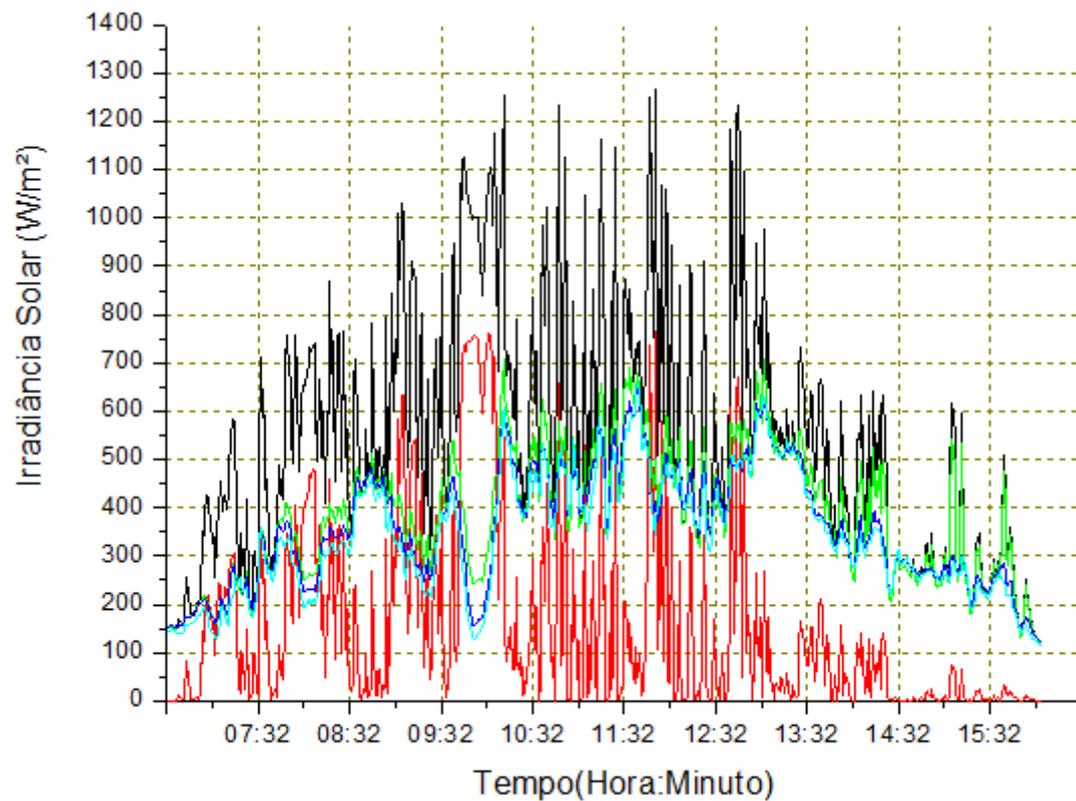


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	-7,16446	6,83815		
B	1,11803	0,02137		
R	SD	N	P	
0,90949	55,32574	574	<0.0001	

Dia Juliano 359: 25 de dezembro de 2011

Dia 359(2011):25 de Dezembro
— IrradGlobal:PSP(Horizontal)
— IrradDireta:Pireliômetro(Horizontal)
— IrradDifusa:Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
— IrradDifusa:Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
— IrradDifusa:MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)

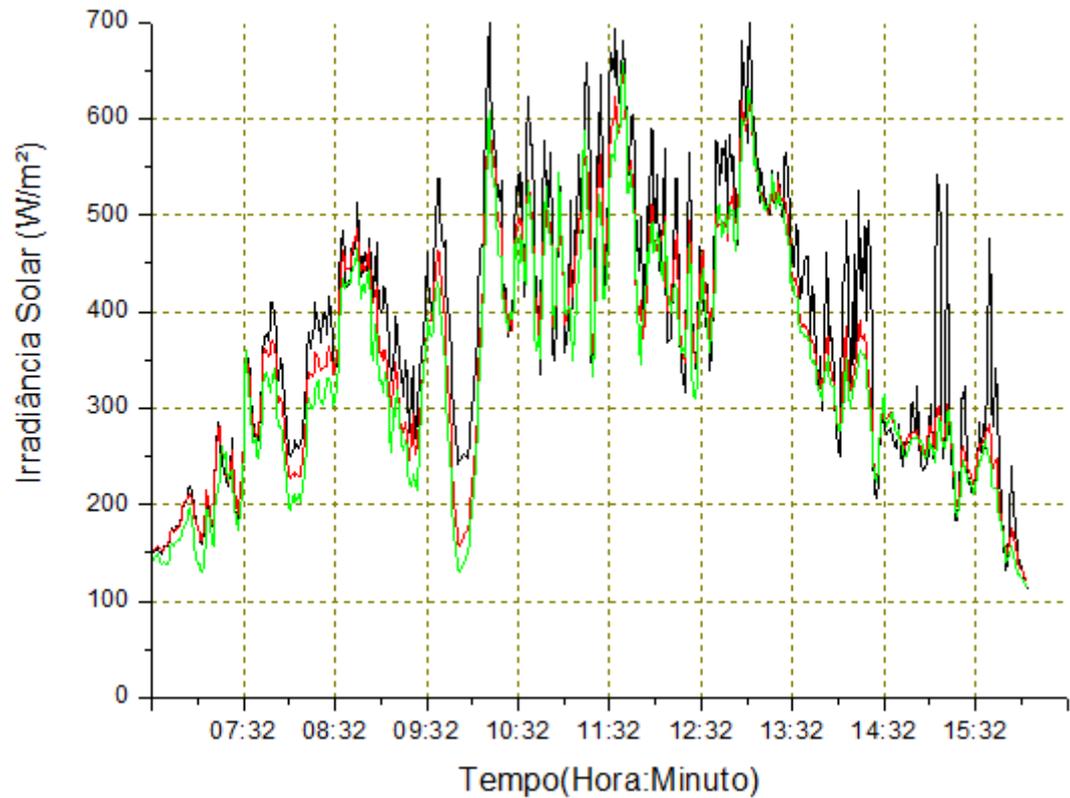


Dia 359(2011): 25 de Dezembro

— Irradiância Difusa de Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)

— Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

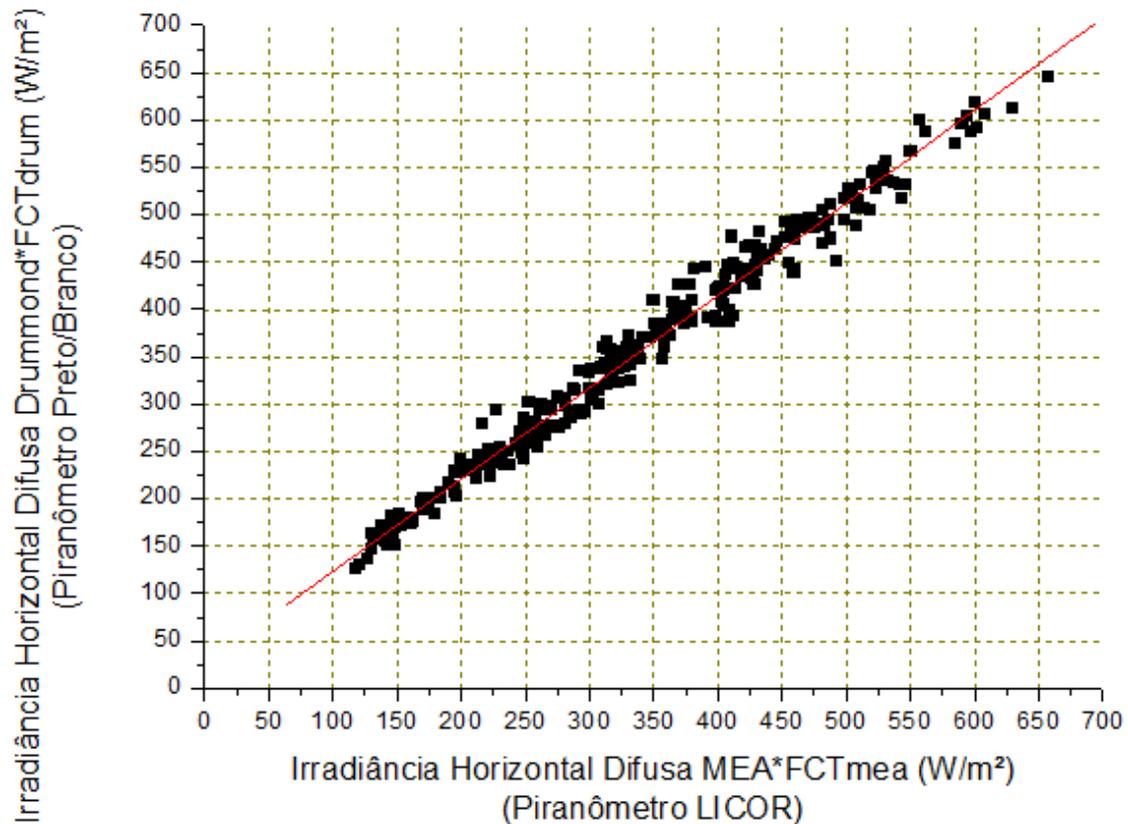
— Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 359: 25 de dezembro de 2011			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,51	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,097	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,16	X	1,045
			= 1,13
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	537,06 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	154,08 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	382,98 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	356,73 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	339,76 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
I _{difusa} (MEA)*FCTmea X I _{difusa} (Drummond)*FCTdrum	27,4(7,68%)		(-19,66)(-5,51%)
I _{difusa} (Drummond)*FCTdrum X I _{difusa} (Referência)	44,23(11,55%)		(-22,52)(-5,88%)
I _{difusa} (MEA)*FCTmea X I _{difusa} (Referência)	62(16,19%)		(-41,63)(-10,87%)

Dia 359(2011):25 de Dezembro

- Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear

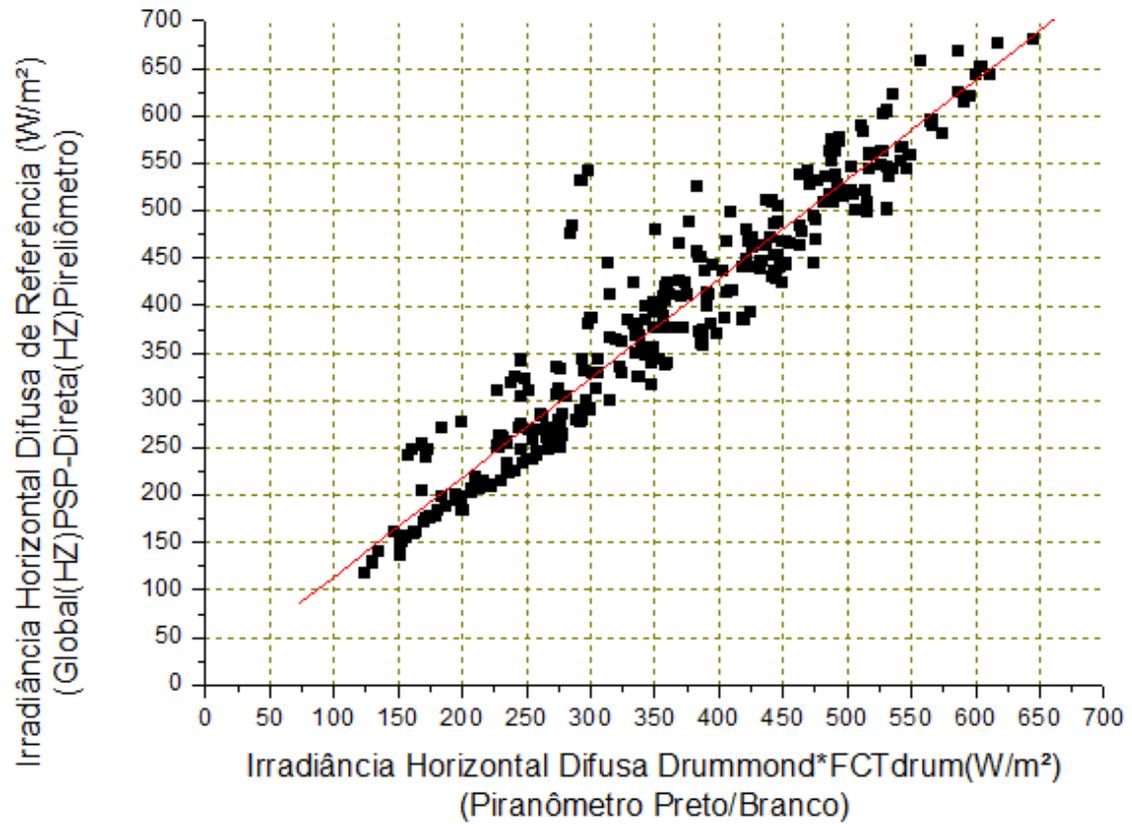


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	26,50516	2,04274		
B	0,97194	0,00565		
R	SD	N	P	
0,99048	16,76454	574	<0.0001	

Dia 359(2011):25 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

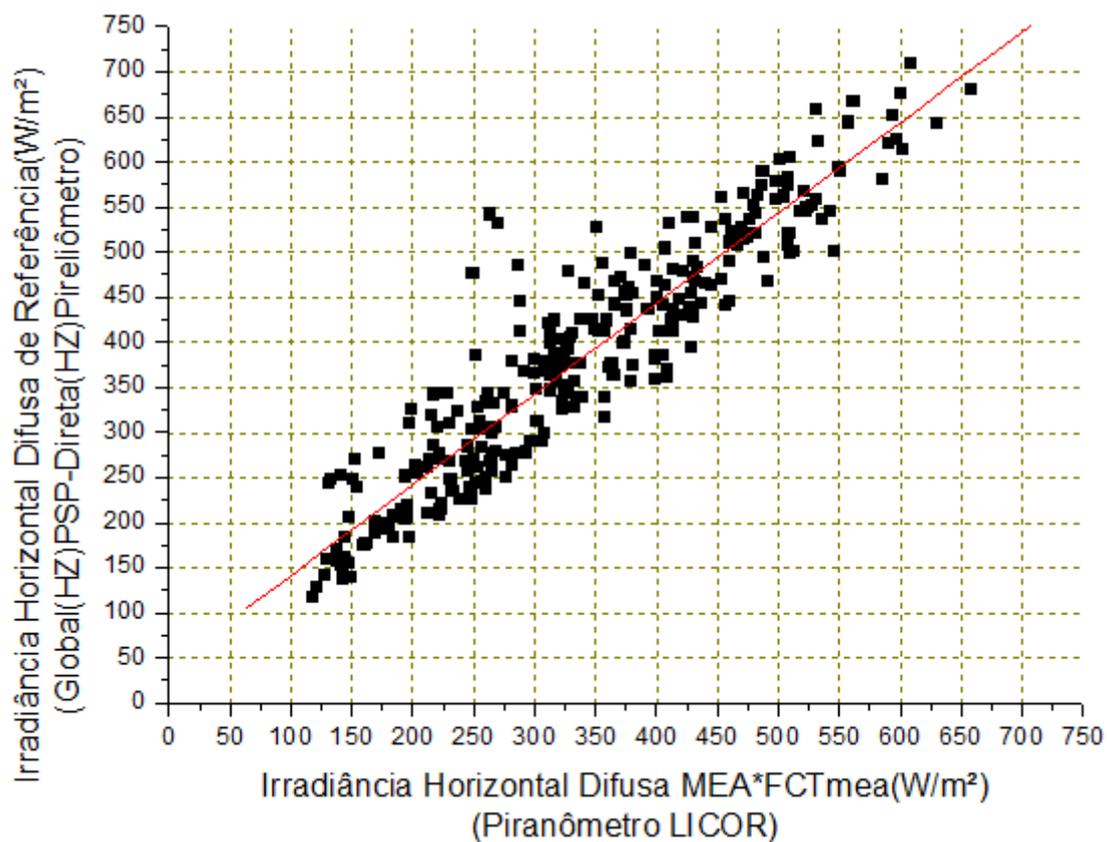


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Ualue	Error		
A	9,74459	5,16548		
B	1,04628	0,01371		
R	SD	N	P	
0,95426	39,91745	574	<0.0001	

Dia 359(2011):25 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear



$$Y = A + B * X$$

Parameter	Uvalue	Error		
A	41,82652	5,84309		
B	1,00412	0,01616		
R	SD	N	P	
0,93327	47,95363	574	<0.0001	

Dia Juliano 360: 26 de dezembro de 2011

Dia 360(2011):26 de Dezembro

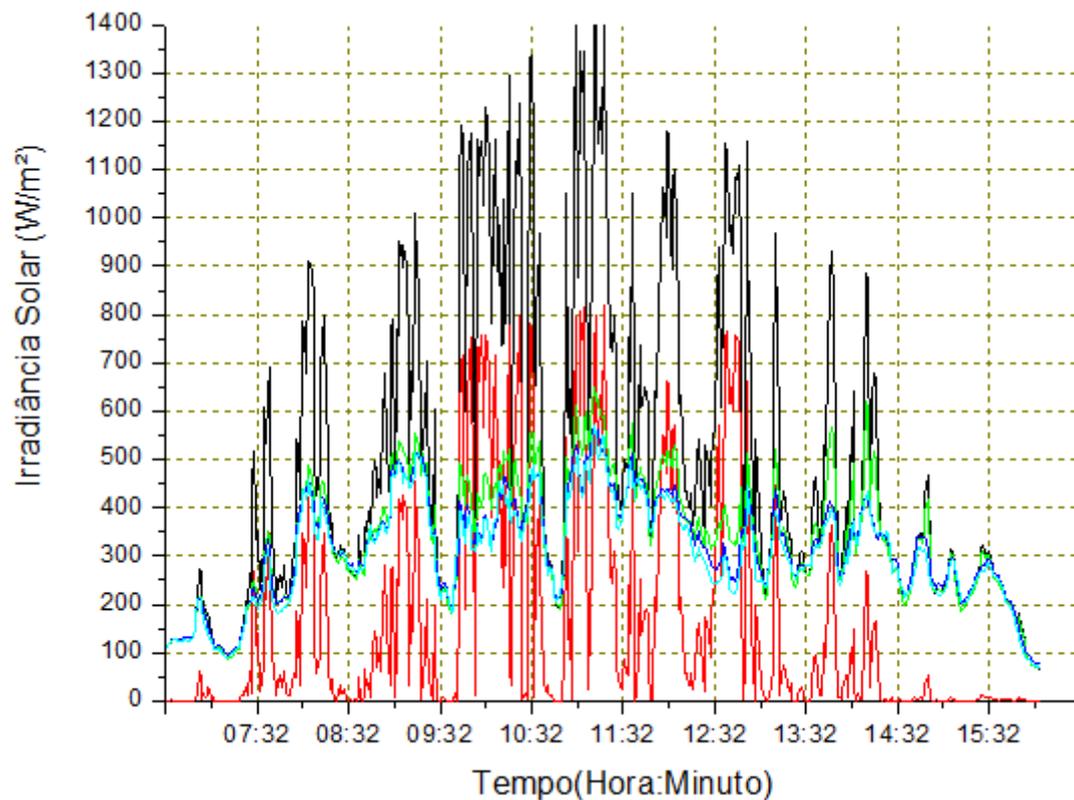
— IrradGlobal:PSP(Horizontal)

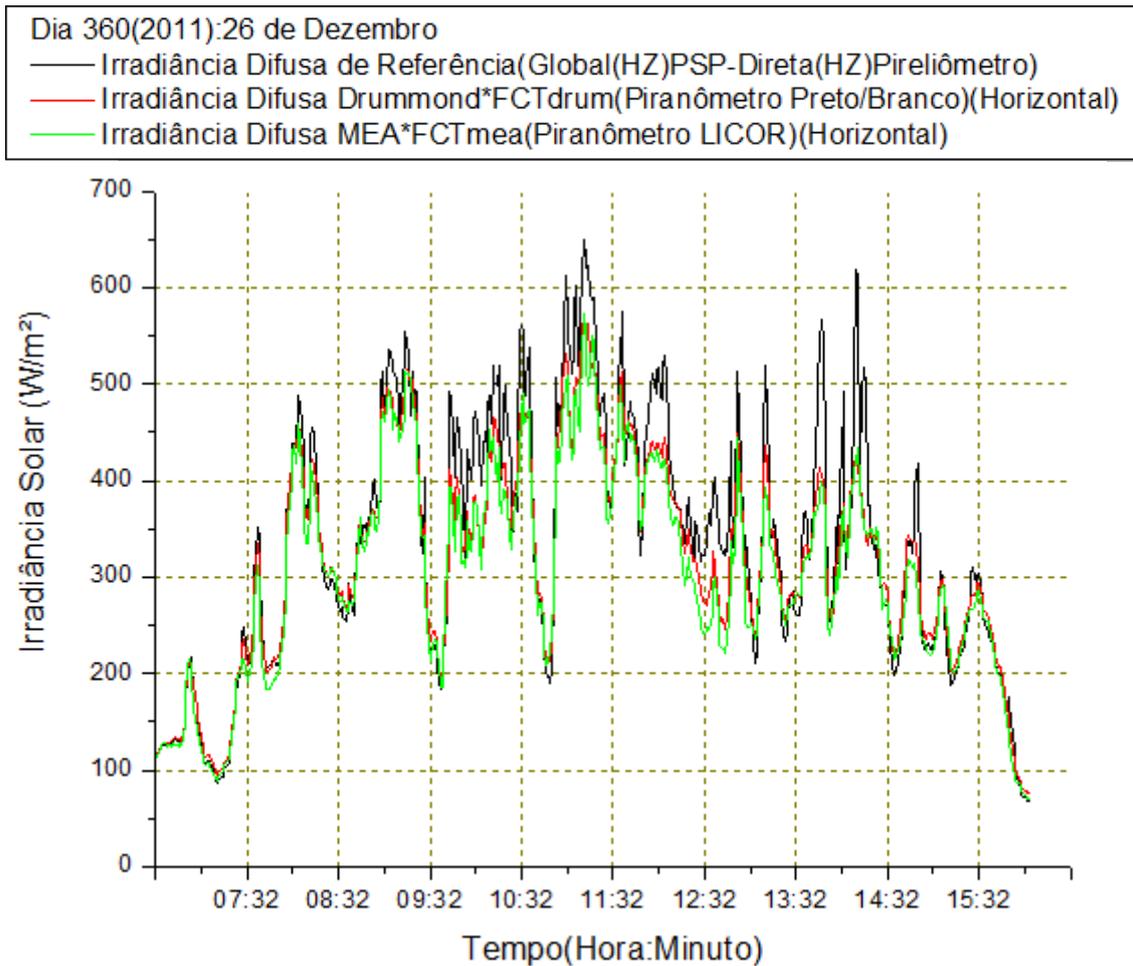
— IrradDireta:Pireliômetro(Horizontal)

— IrradDifusa:Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)

— IrradDifusa:Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

— IrradDifusa:MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)

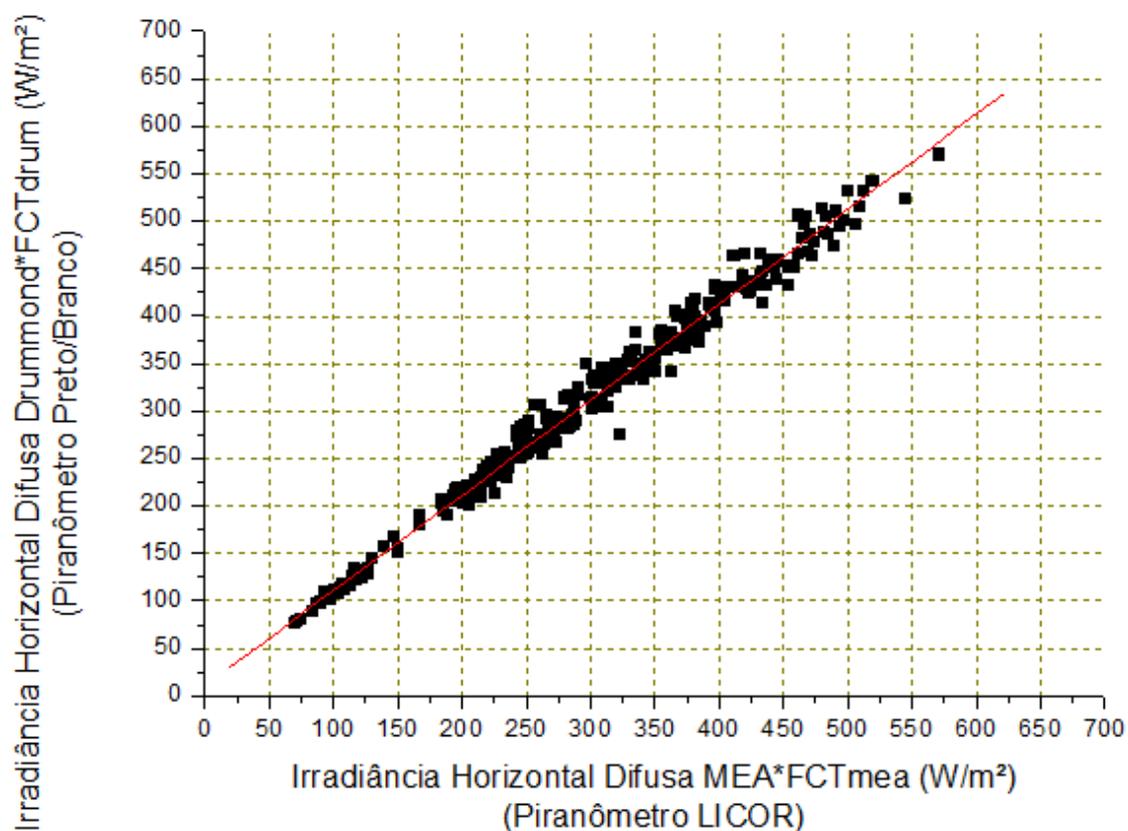




Dia 360: 26 de dezembro de 2011			
Dados armazenados a cada minuto - $\theta_z=70^\circ$ Céu parcialmente nublado:Kt =0,47			
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,097	X	FC Anisotrópico 1,03 = 1,13
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,16	X	1,045 = 1,21
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	492,98 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	157,42 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	335,56 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	317,26 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	305,39 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	18,37(5,79%)		(-12,79)(-4,03%)
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	32,08(9,56%)		(-10,23)(-3,05%)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	40,7(12,13%)		(-23,19)(-6,91%)

Dia 360(2011):26 de Dezembro

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

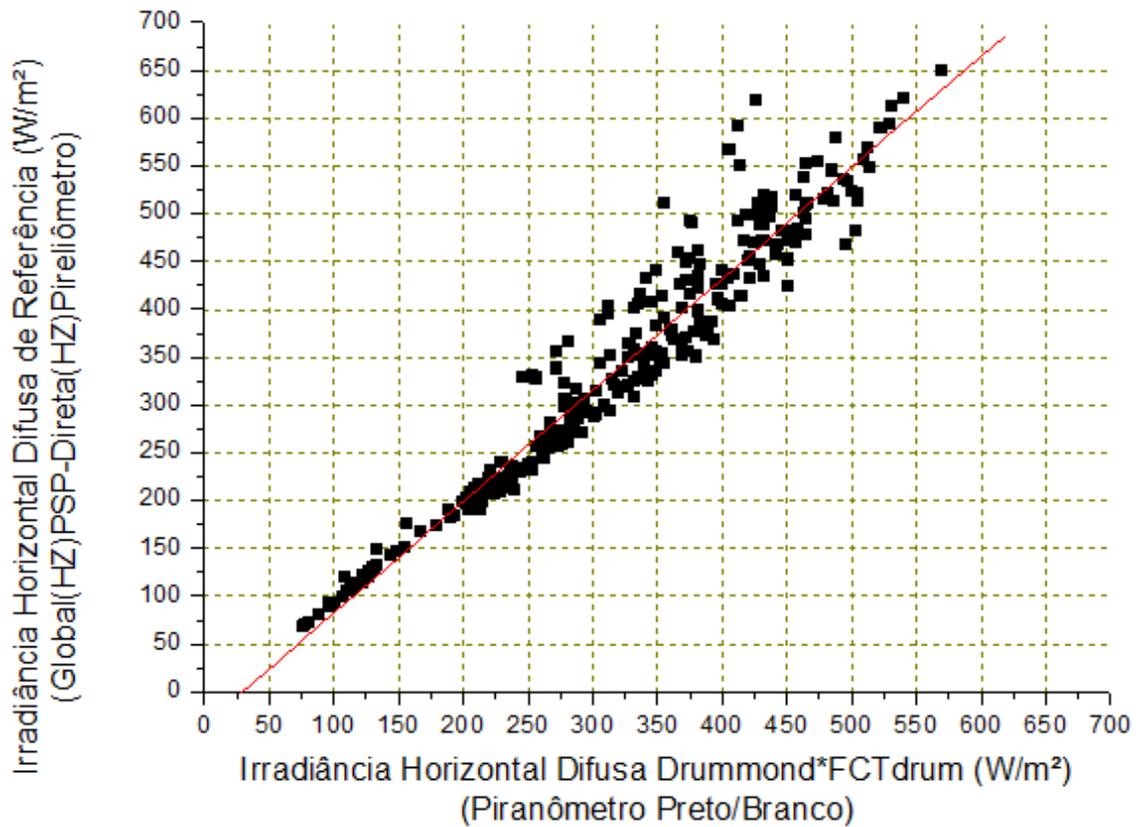


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	10,90544	1,65713	
B	1,00316	0,00512	
R	SD	N	P
0,99264	13,2128	574	<0.0001

Dia 360(2011):26 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

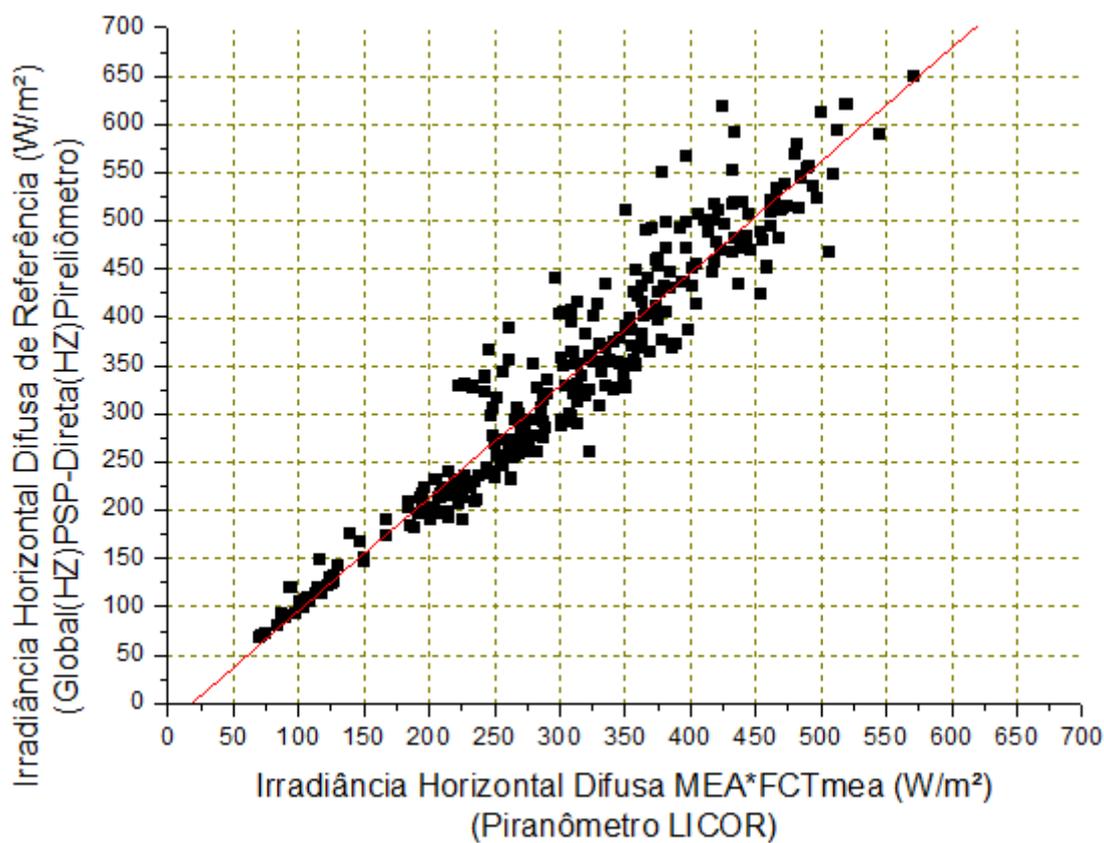


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	-33,89523	4,26095		
B	1,1645	0,0127		
R	SD	N	P	
0,96761	33,148	574	<0.0001	

Dia 360(2011):26 de Dezembro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear

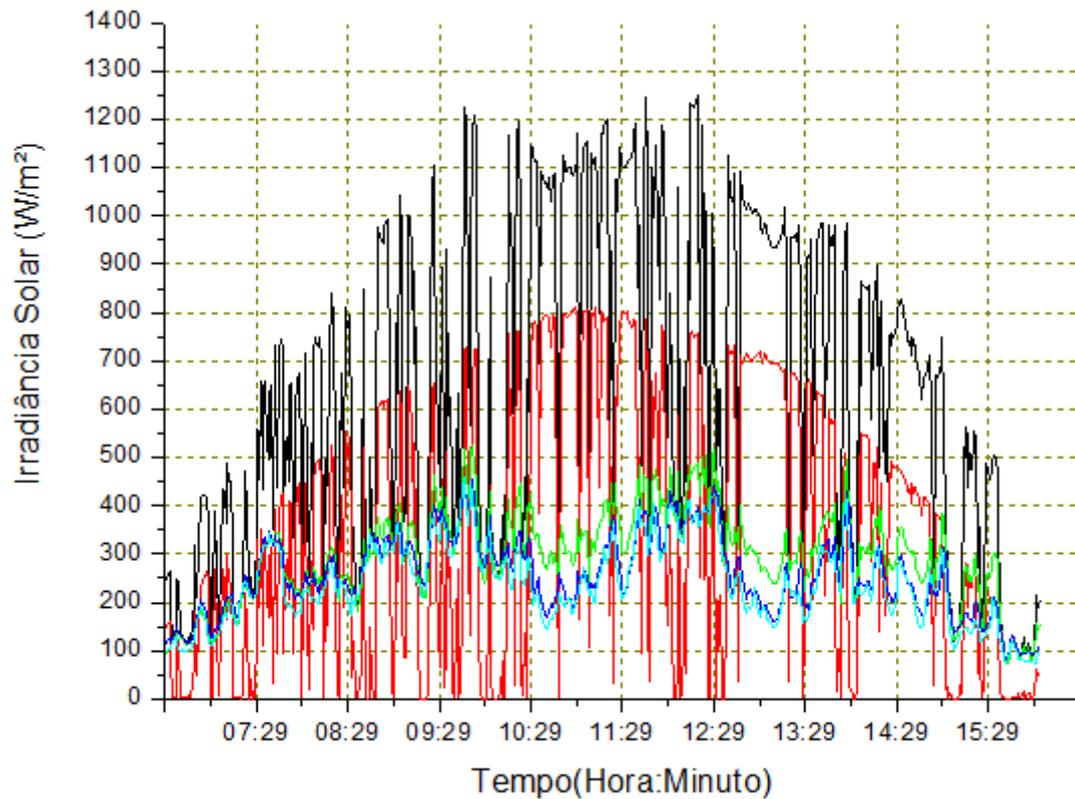


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	-20,19458	4,73394		
B	1,16489	0,01462		
R	SD	N	P	
0,9578	37,74515	574	<0.0001	

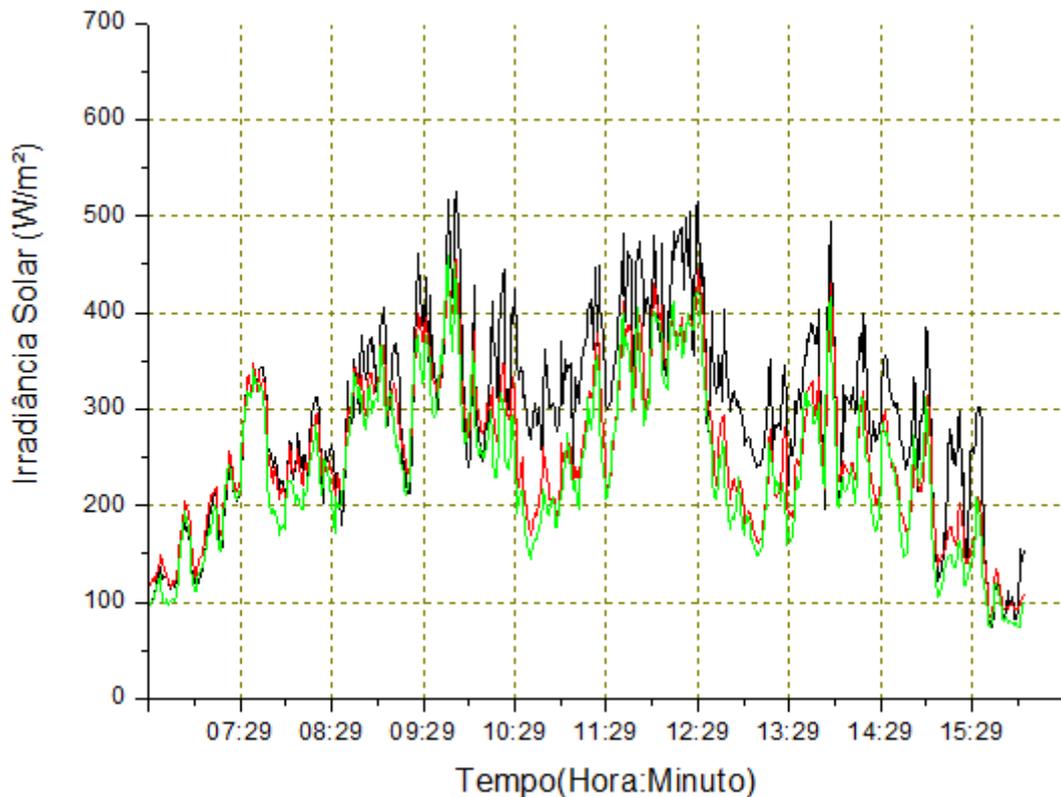
Dia Juliano 01: 01 de janeiro de 2012

Dia 01(2012):01 de janeiro
— IrradGlobal:PSP(Horizontal)
— IrradDireta:Pireliômetro(Horizontal)
— IrradDifusa:Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
— IrradDifusa:Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
— IrradDifusa:MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 01(2012):01 de Janeiro

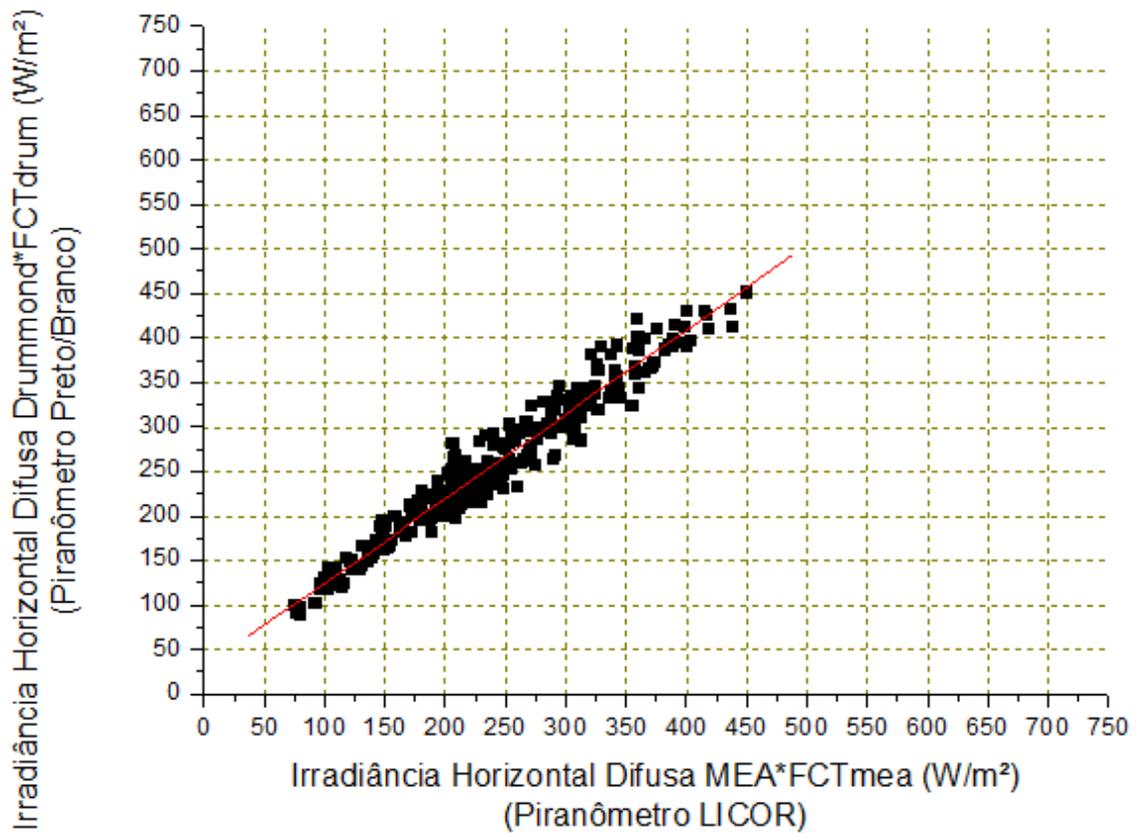
— Irradiância Difusa de Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
 — Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
 — Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 01: 01 de janeiro de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,58	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,098	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,16	X	1,045
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	635,07 W/m ²		= 1,13
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	340,32 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	294,75 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drum}	256,96 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	239,46 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	27,93(10,87%)		(-19,73)(-7,68%)
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	53,11(18,02%)		(-31,83)(-10,8%)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	67,73(22,98%)		(-52,14)(-17,69%)

Dia 01(2012):01 de Janeiro

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

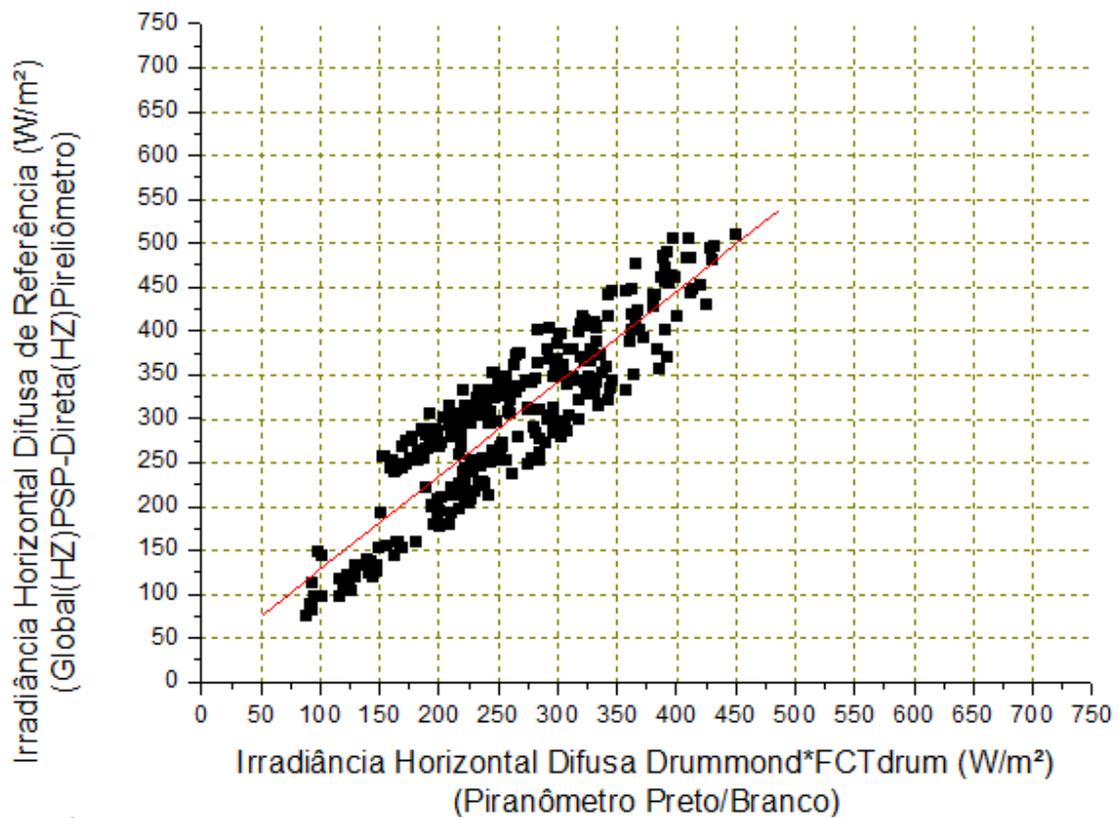


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	29,61816	2,3103	
B	0,94939	0,00911	
R	SD	N	P
0,97467	18,26054	574	<0.0001

Dia 01(2012):01 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

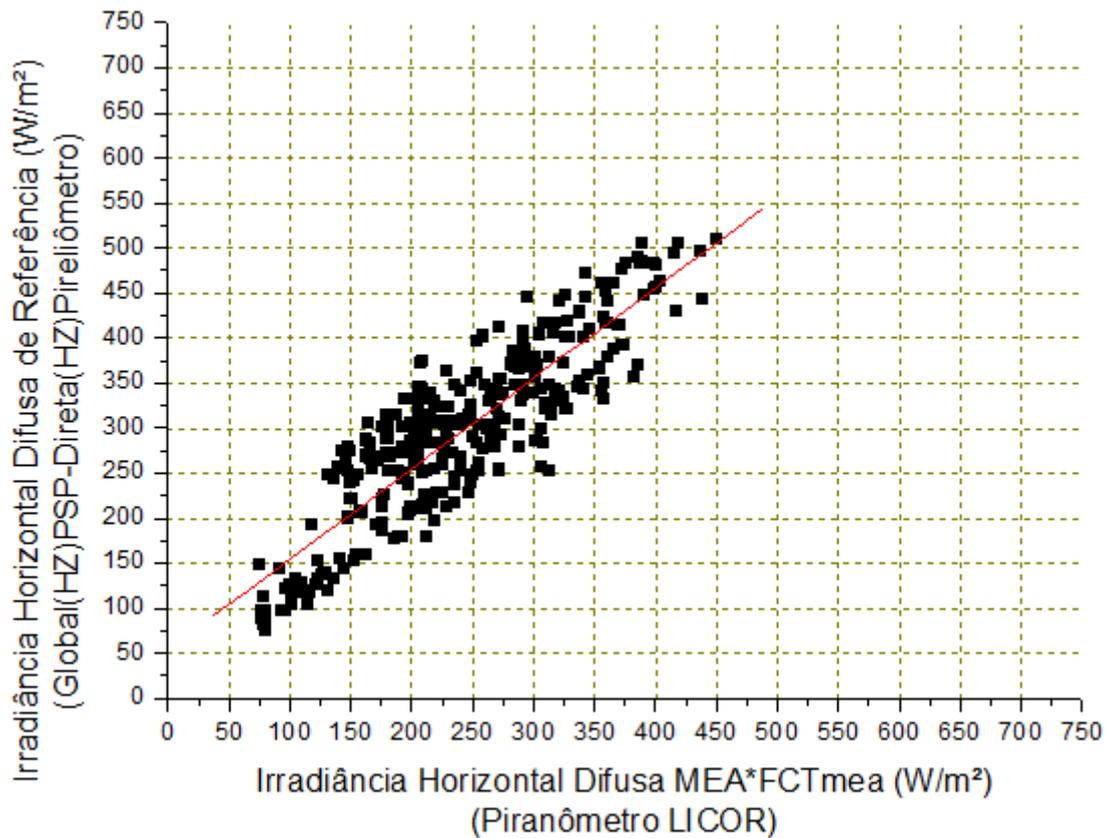


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	22,0587	5,78585		
B	1,06125	0,02146		
R	SD	N	P	
0,90022	41,91473	574	<0.0001	

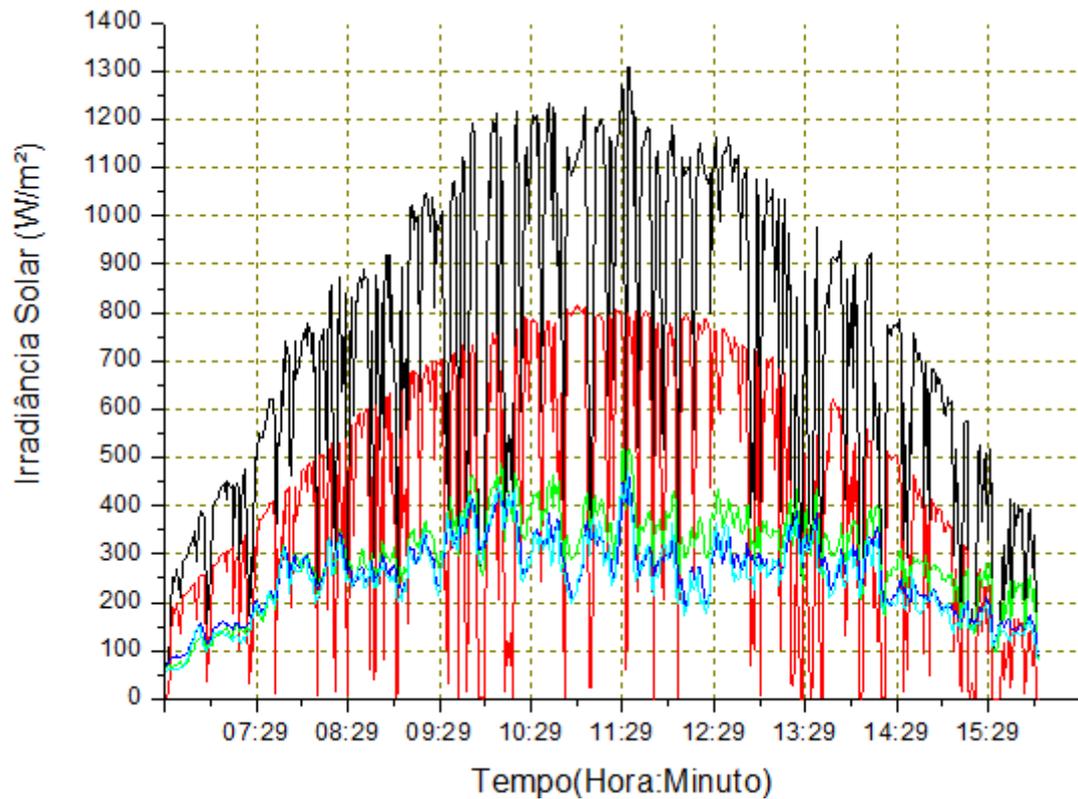
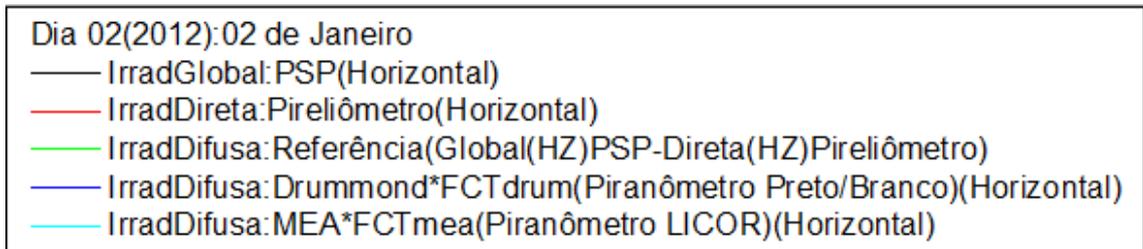
Dia 01(2012):01 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Horizontal Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear



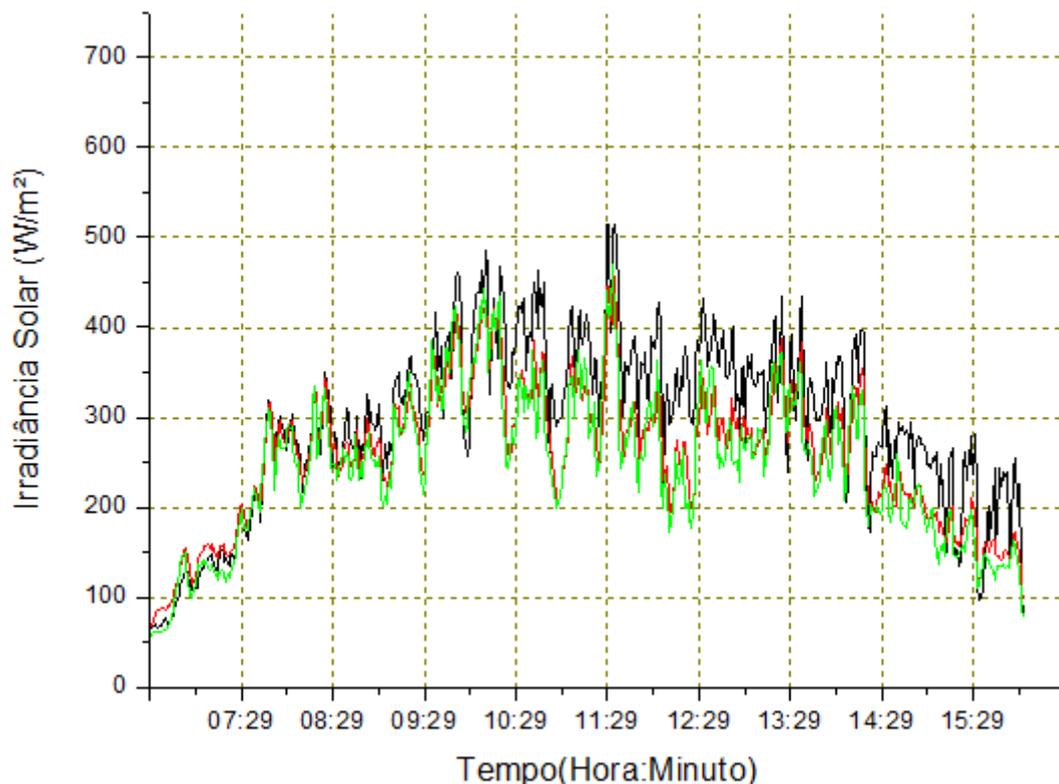
$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	54,02961	5,8858		
B	1,00529	0,0232		
R	SD	N	P	
0,87547	46,5211	574	<0.0001	

Dia Juliano 02: 02 de janeiro de 2012

Dia 02(2012):02 de Janeiro

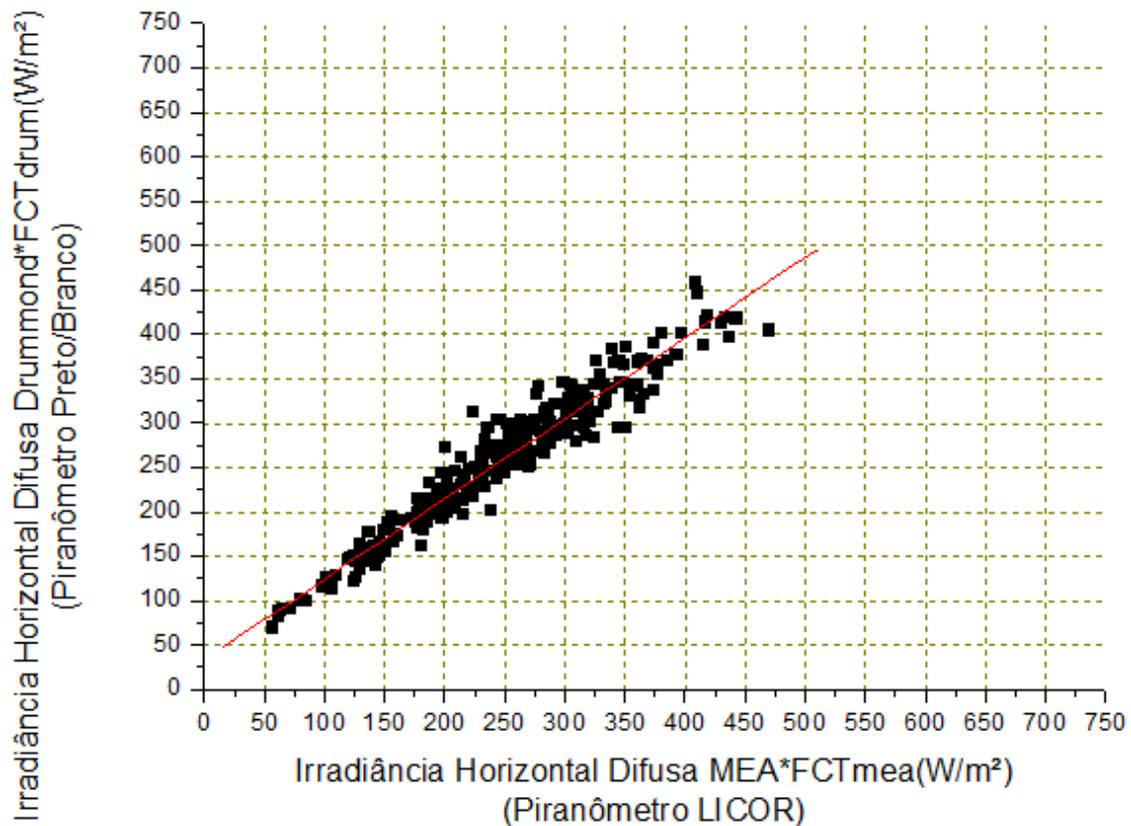
— Irradiância Difusa de Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
 — Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
 — Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 02: 02 de janeiro de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\theta_z=70^\circ$		Céu claro:Kt =0,66	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,099	X	FC Anisotrópico 1,07 = 1,18
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,16	X	1,125 = 1,31
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	705,65 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	411,83 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	293,82 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drum}	258,58 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	248,12 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	(25,73)(9,95%)		(-13,06)(-5,05%)
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	(49,57)(16,87%)		(-27,15)(-9,24%)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	(58,65)(19,96%)		(-41,13)(-14%)

Dia 02(2012):02 de Janeiro

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

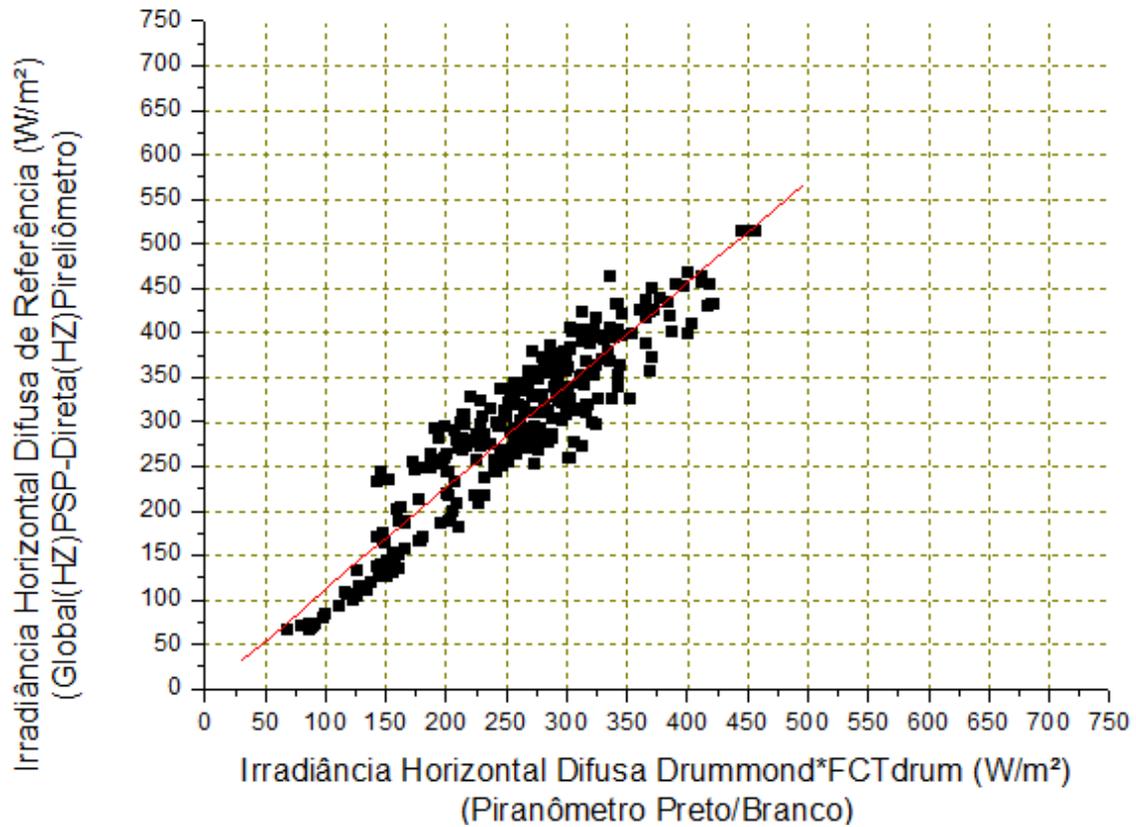


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Ualue	Error	
A	33,8347	2,55261	
B	0,90579	0,00976	
R	SD	N	P
0,96836	19,32485	574	<0.0001

Dia 02(2012):02 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

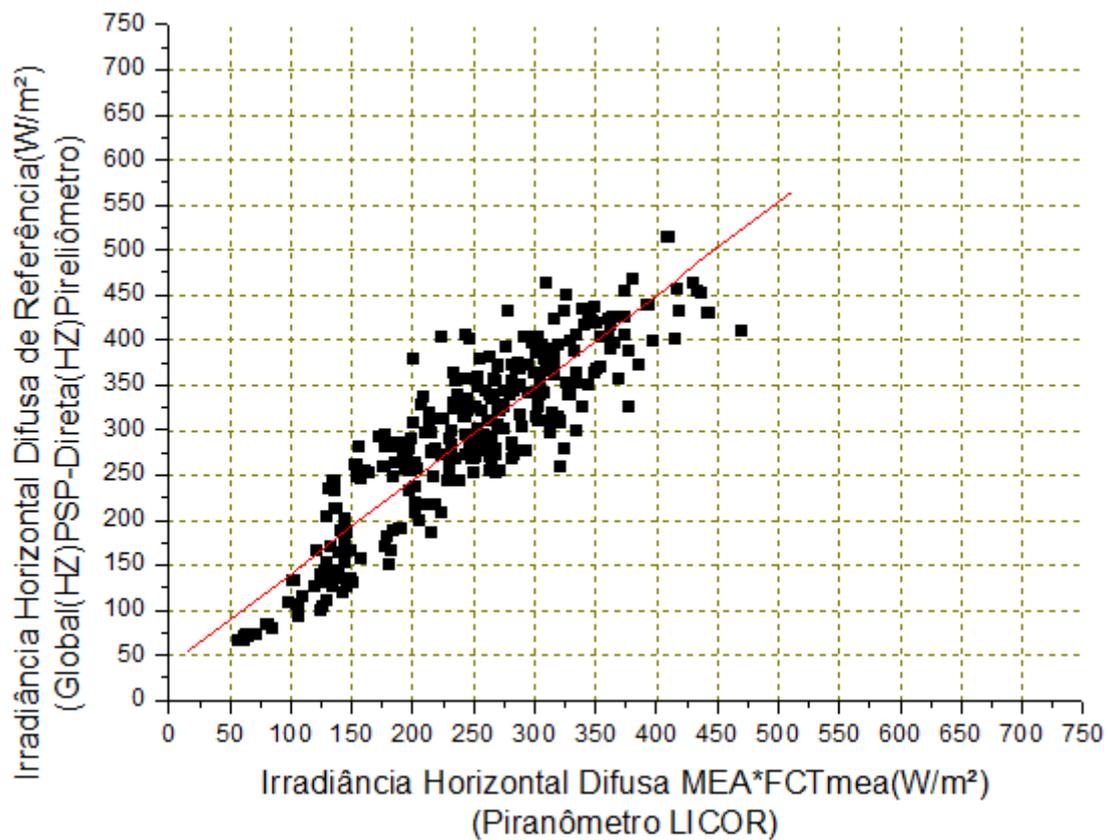


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Ualue	Error		
A	-2,74655	5,3167		
B	1,14691	0,0197		
R	SD	N	P	
0,92499	36,48296	574	<0.0001	

Dia 02(2012):02 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear



$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	38,32252	5,83526		
B	1,02974	0,02231		
R	SD	N	P	
0,88786	44,17659	574	<0.0001	

Dia Juliano 18: 18 de janeiro de 2012

Dia 18(2012):18 de Janeiro

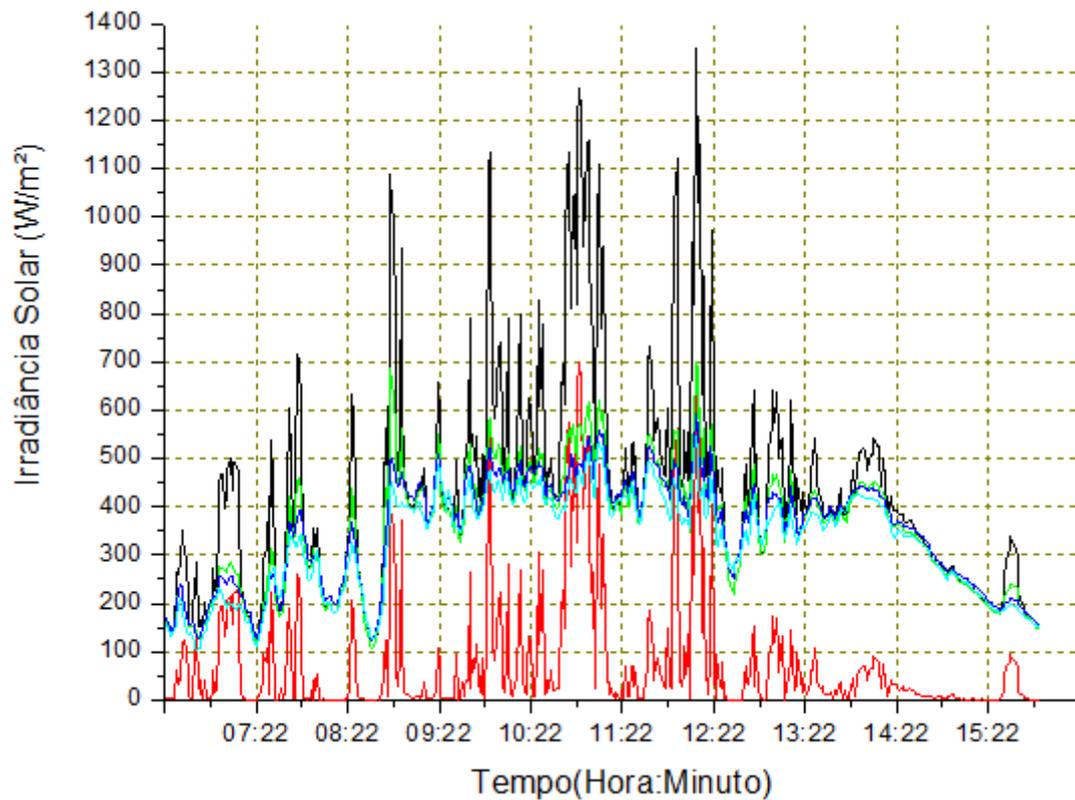
— IrradGlobal:PSP(Horizontal)

— IrradDireta:Pireliômetro(Horizontal)

— IrradDifusa:Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)

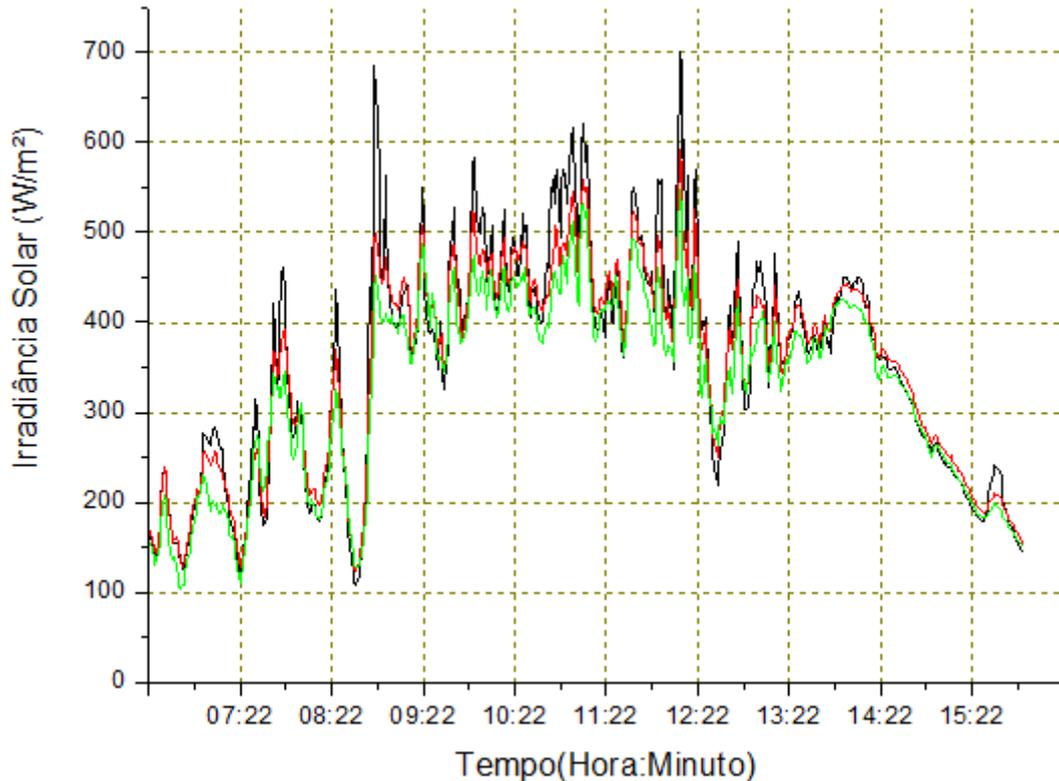
— IrradDifusa:Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

— IrradDifusa:MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 18(2012): 18 de Janeiro

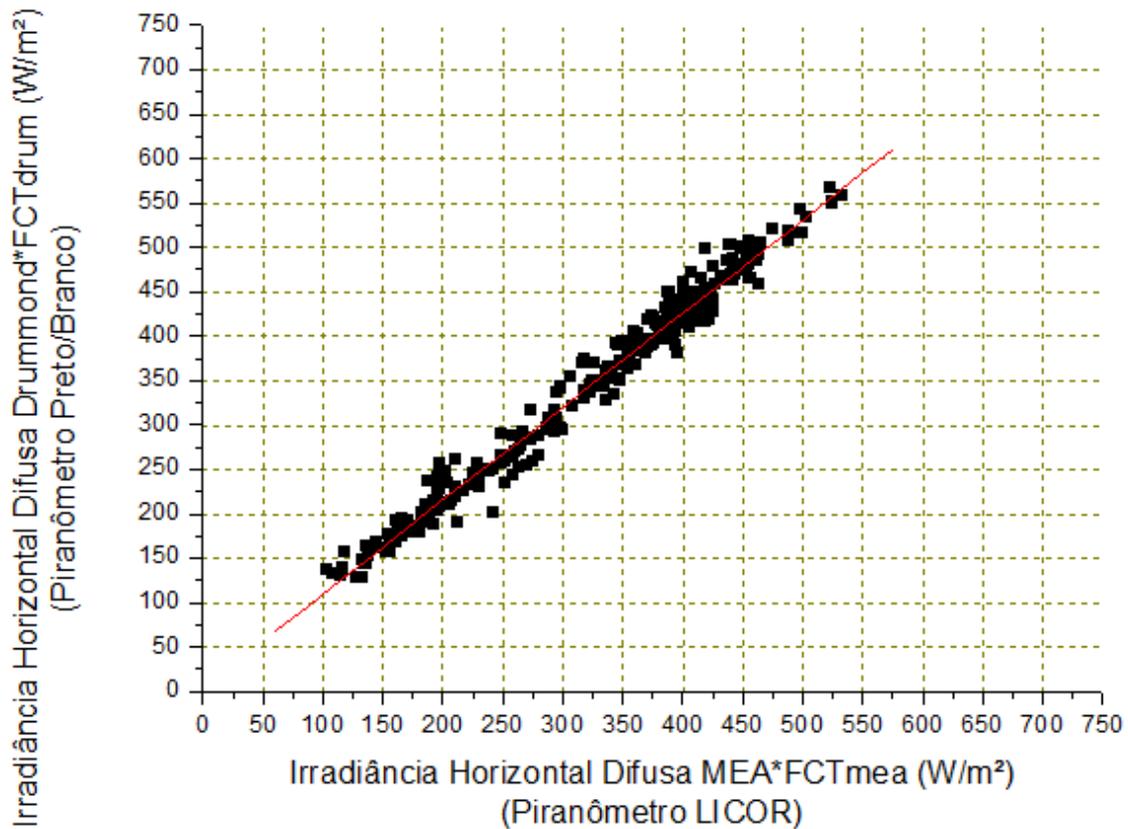
— Irradiância Difusa de Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
 — Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
 — Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 18: 18 de janeiro de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,39	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,104	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,17	X	1,045
			= 1,14
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	429,51 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	74,73 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	354,78 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	349,81 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	327,78 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	(28,54)(8,16%)		(-22,11)(-6,32%)
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	(24,59)(6,93%)		(0,11)(0,03%)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	(40,62)(11,45%)		(-21,89)(-6,17%)

Dia 18(2012):18 de Janeiro

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

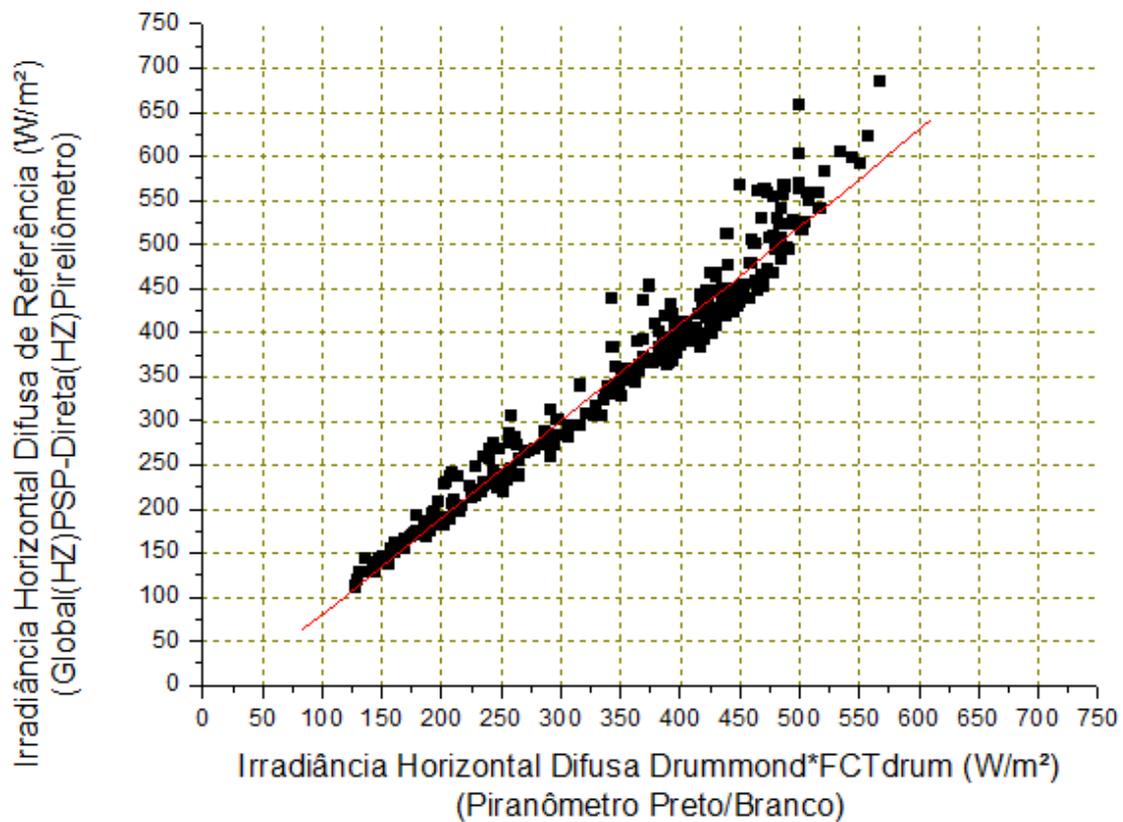


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	4,92364	2,15496		
B	1,05219	0,00626		
R	SD	N	P	
0,99003	15,76667	574	<0.0001	

Dia 18(2012):18 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

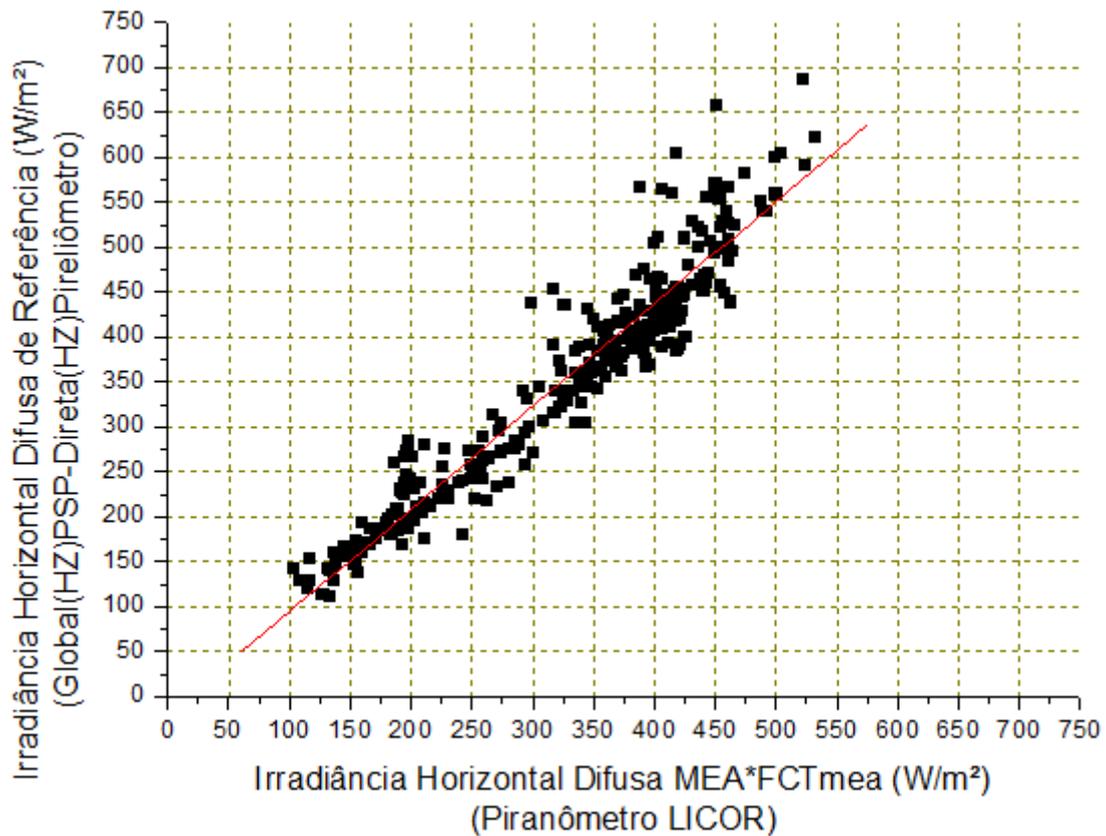


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Uvalue	Error		
A	-29,55874	3,64976		
B	1,09873	0,00994		
R	SD	N	P	
0,97739	26,6029	574	<0.0001	

Dia 18(2012):18 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear

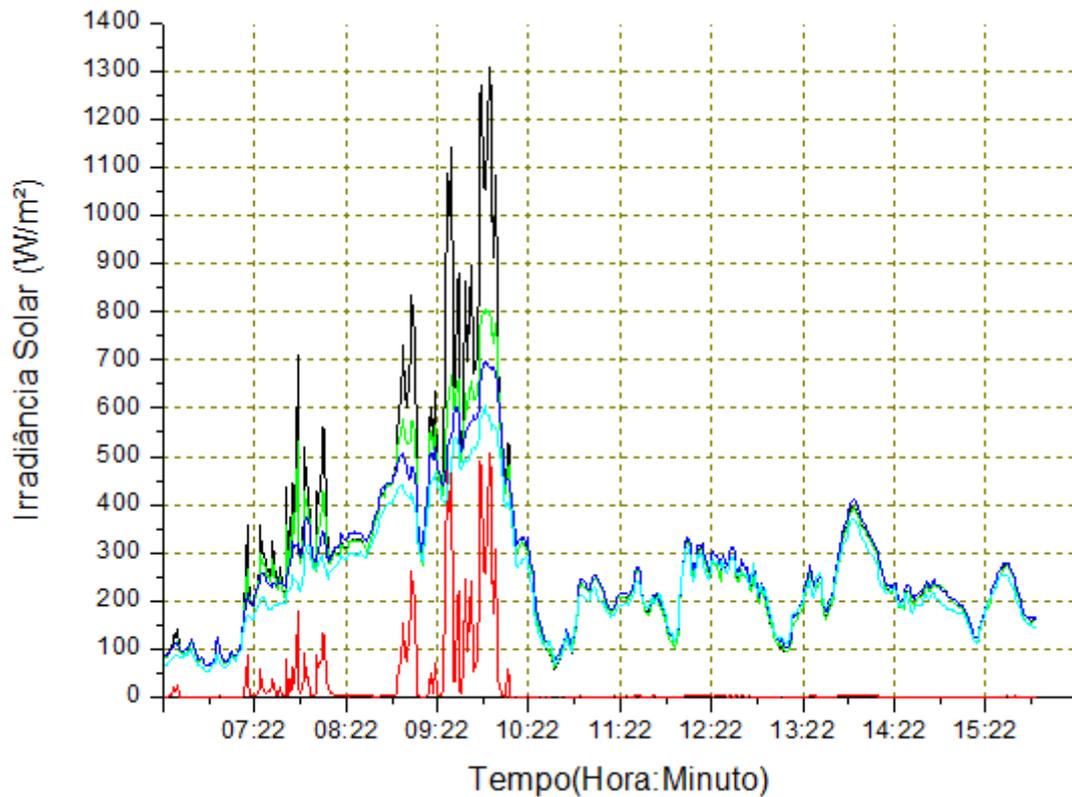


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	-19,34874	5,07904		
B	1,14143	0,01476		
R	SD	N	P	
0,95538	37,16052	574	<0.0001	

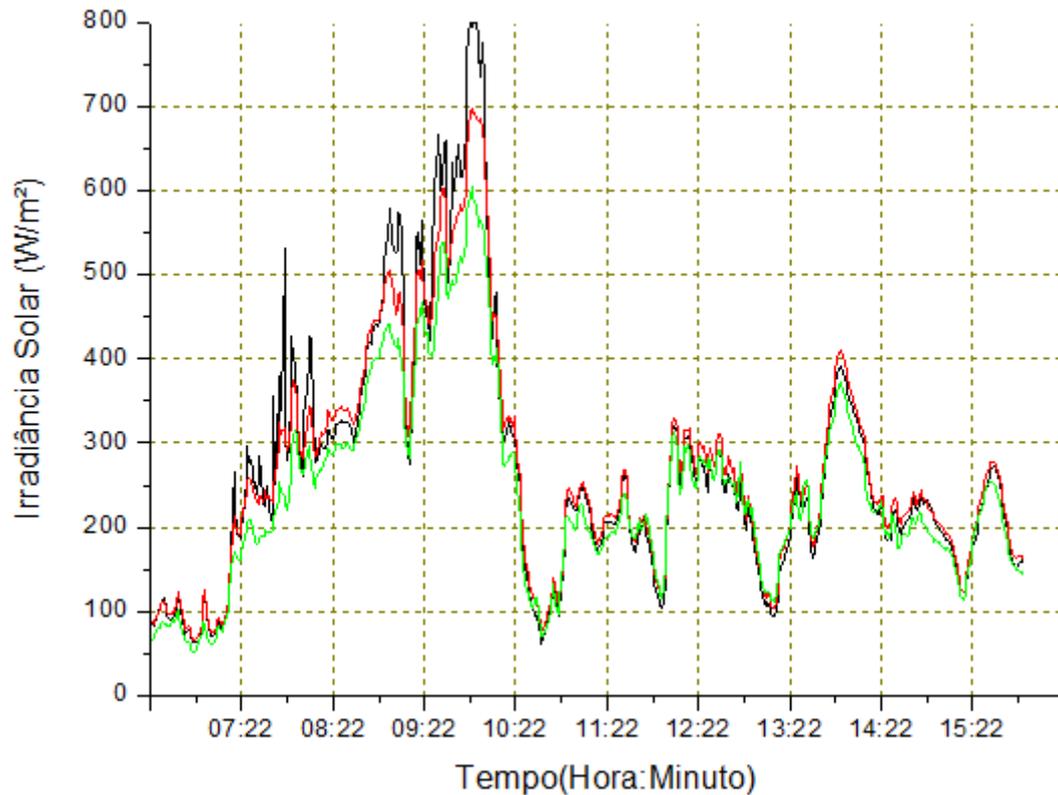
Dia Juliano 19: 19 de janeiro de 2012

Dia 19(2012):19 de Janeiro
— IrradGlobal:PSP(Horizontal)
— IrradDireta:Pireliômetro(Horizontal)
— IrradDifusa:Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
— IrradDifusa:Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
— IrradDifusa:MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 19(2012):19 de Janeiro

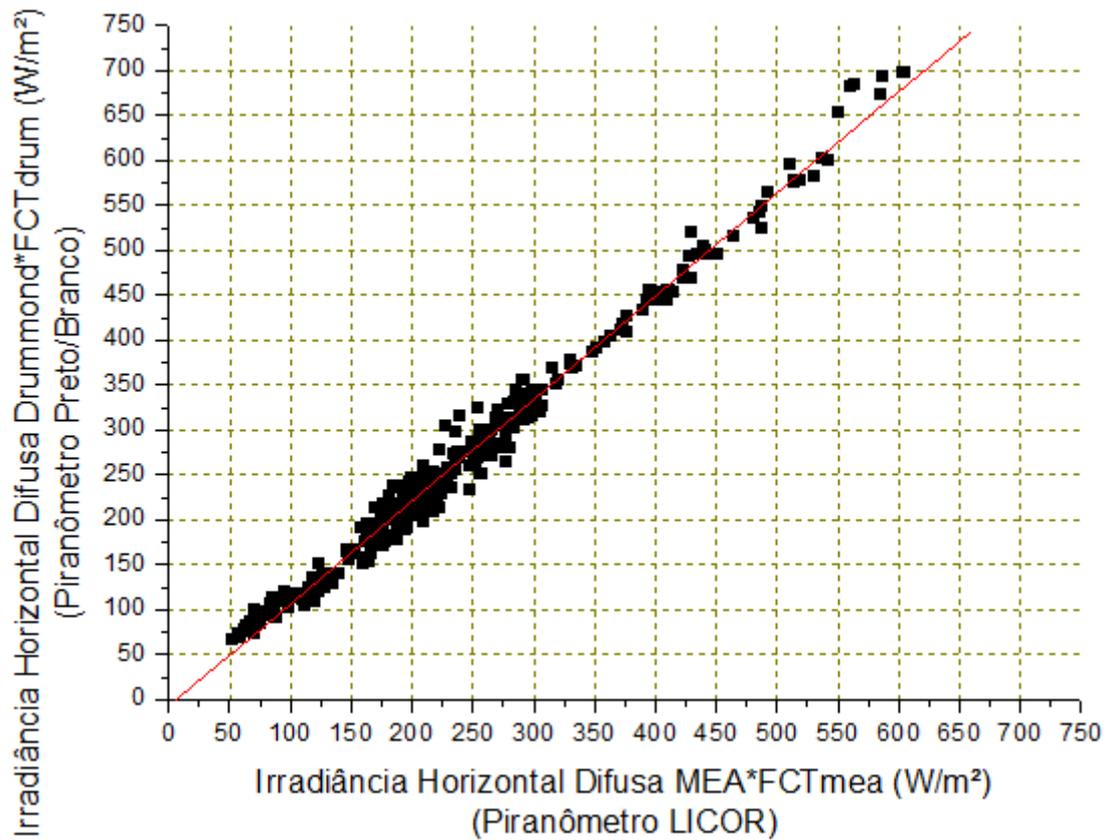
— Irradiância Difusa de Referência(Global(HZ)PSP-Direta(HZ)Pireliômetro)
 — Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)
 — Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 19: 19 de janeiro de 2012				
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$			Céu nublado:Kt =0,26	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico	1,105	X	FC Anisotrópico = 1,14
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	FC Isotrópico	1,171	X	FC Anisotrópico = 1,14
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g		290,54 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b		22,34 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}		268,2 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}		268,58 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}		241,61 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)			MBE(W/m ²)
	Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	(31,29)(11,65%)		(-25,57)(-9,52%)
	Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	(20,3)(7,57%)		(7,48)(2,79%)
	Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	(35,3)(13,16%)		(-18,18)(-6,78%)

Dia 19(2012): 19 de Janeiro

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

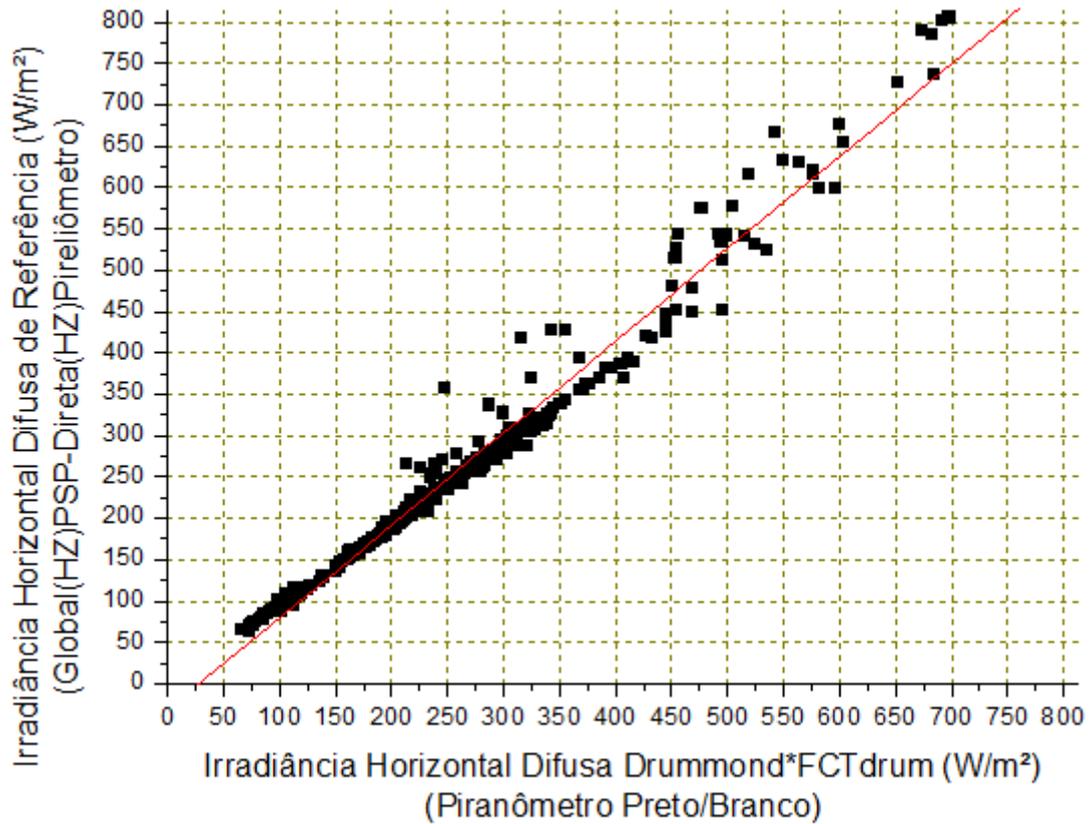


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	-6,89561	1,54766	
B	1,14017	0,00578	
R	SD	N	P
0,99274	16,01707	574	<0.0001

Dia 19(2012): 19 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ)
- Regressão Linear

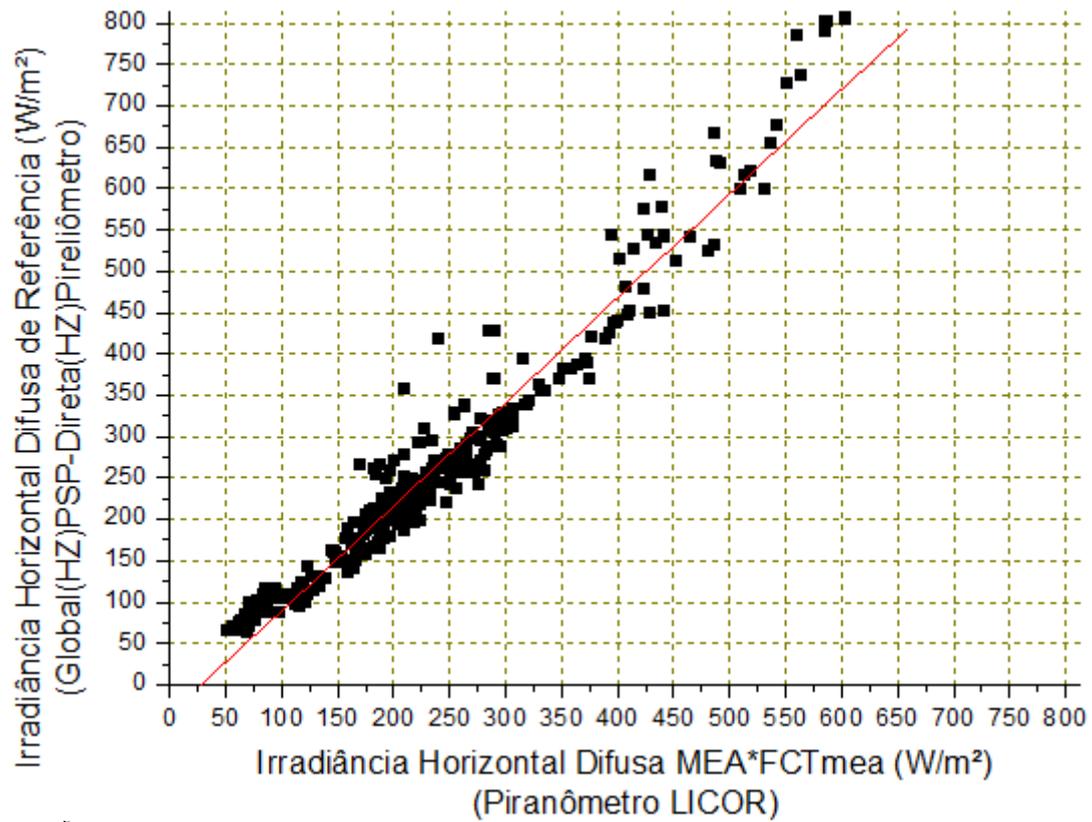


$$Y = A + B * X$$

Parameter	Ualue	Error	
A	-31,20586	2,33213	
B	1,11478	0,00778	
R	SD	N	P
0,98635	24,78109	574	<0.0001

Dia 19(2012): 19 de Janeiro

- Irradiância Difusa de Referência(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear

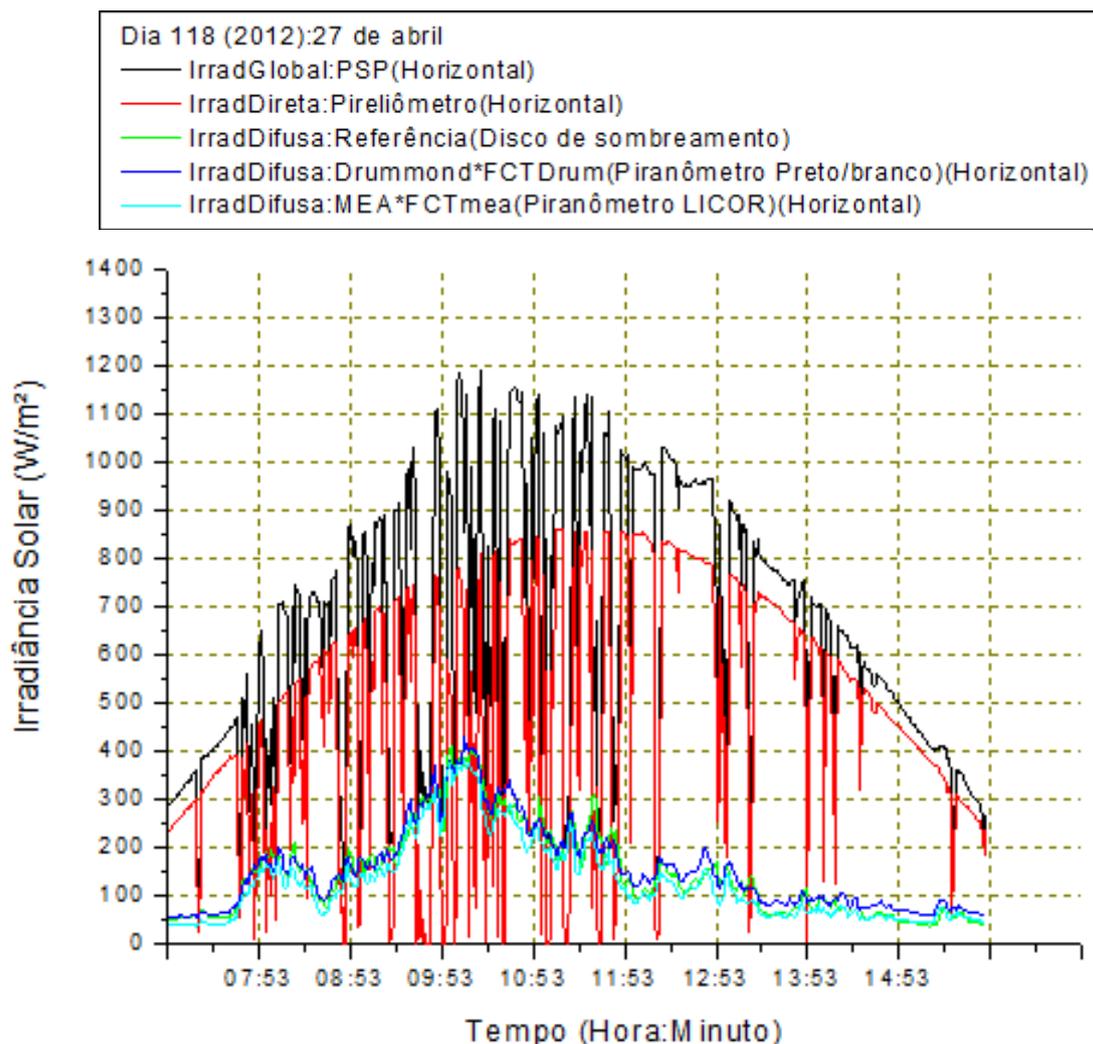


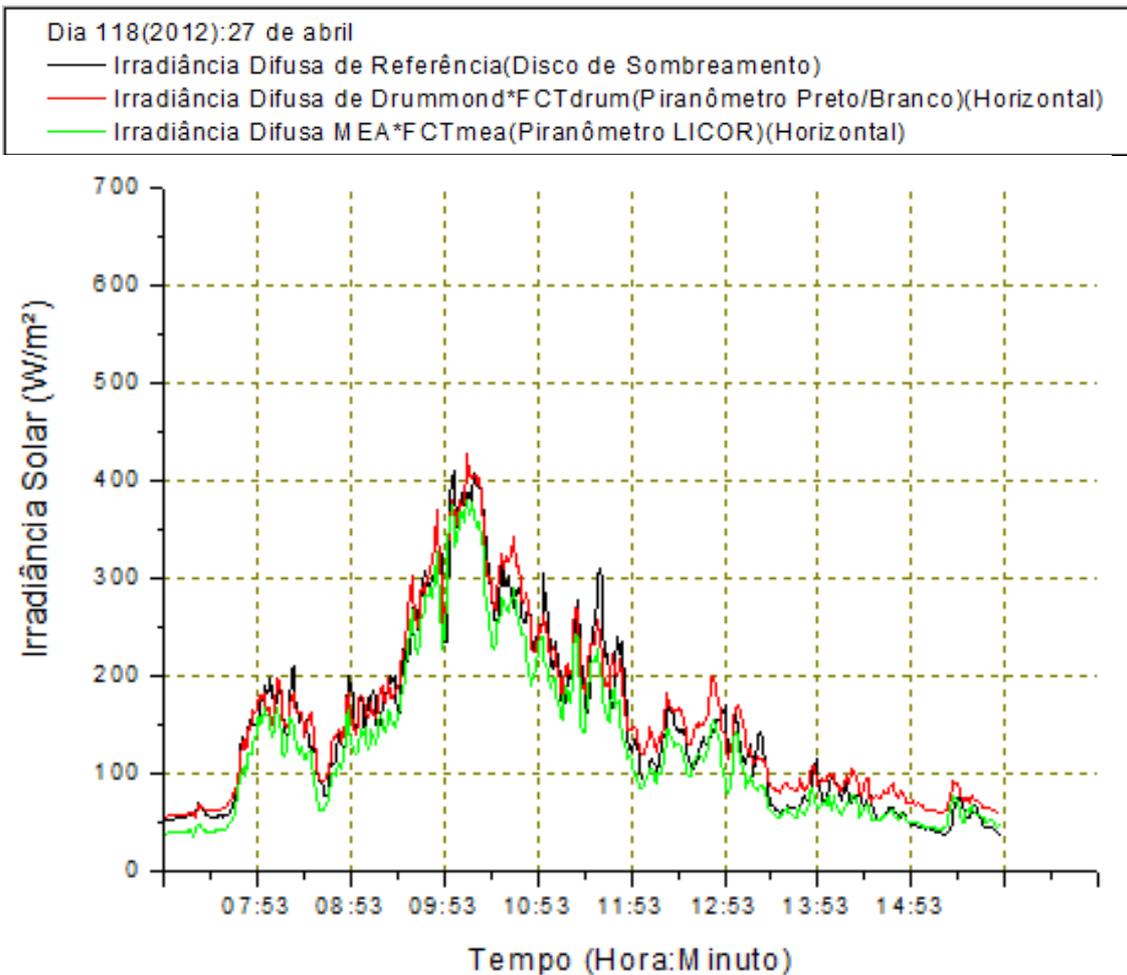
$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	-36,18153	3,50339	
B	1,25981	0,01308	
R	SD	N	P
0,97054	36,25735	574	<0.0001

**APÊNDICE B – Dados coletados com relação à referência 2 – Disco de
sombreamento**

Dia Juliano 118: 27 de abril de 2012

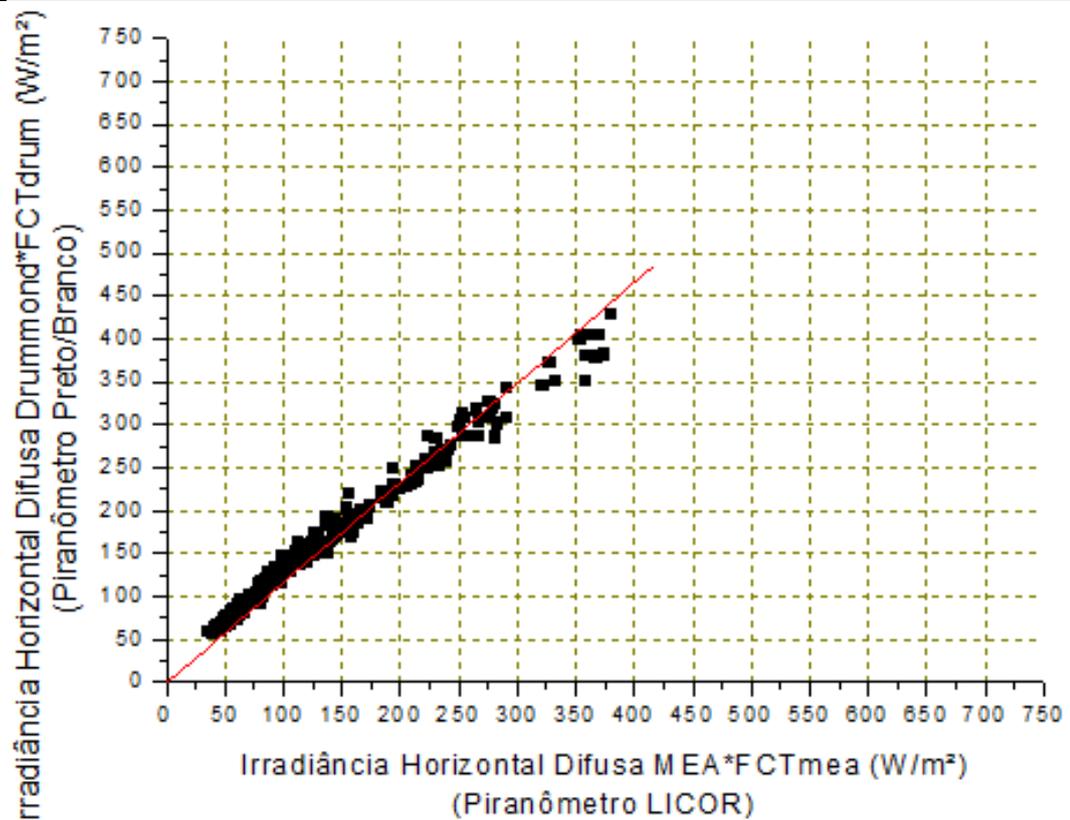




Dia 118: 27 de abril de 2012				
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$ Céu parcialmente nublado:Kt =0,64				
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico	X	FC Anisotrópico	= 1,14
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,106		1,03	
	1,142	X	1,045	= 1,19
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	640,72 W/m ²			
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	479,74 W/m ²			
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	148,37 W/m ²			
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	157,68 W/m ²			
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	130,04 W/m ²			
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)	
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	(35,48)(22,5%)		(-33,05)(-20,96%)	
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	(32,66)(22,01%)		(18,61)(12,54%)	
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	(26,65)(17,96%)		(-17,15)(-11,56%)	

Dia 118(2012):27 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

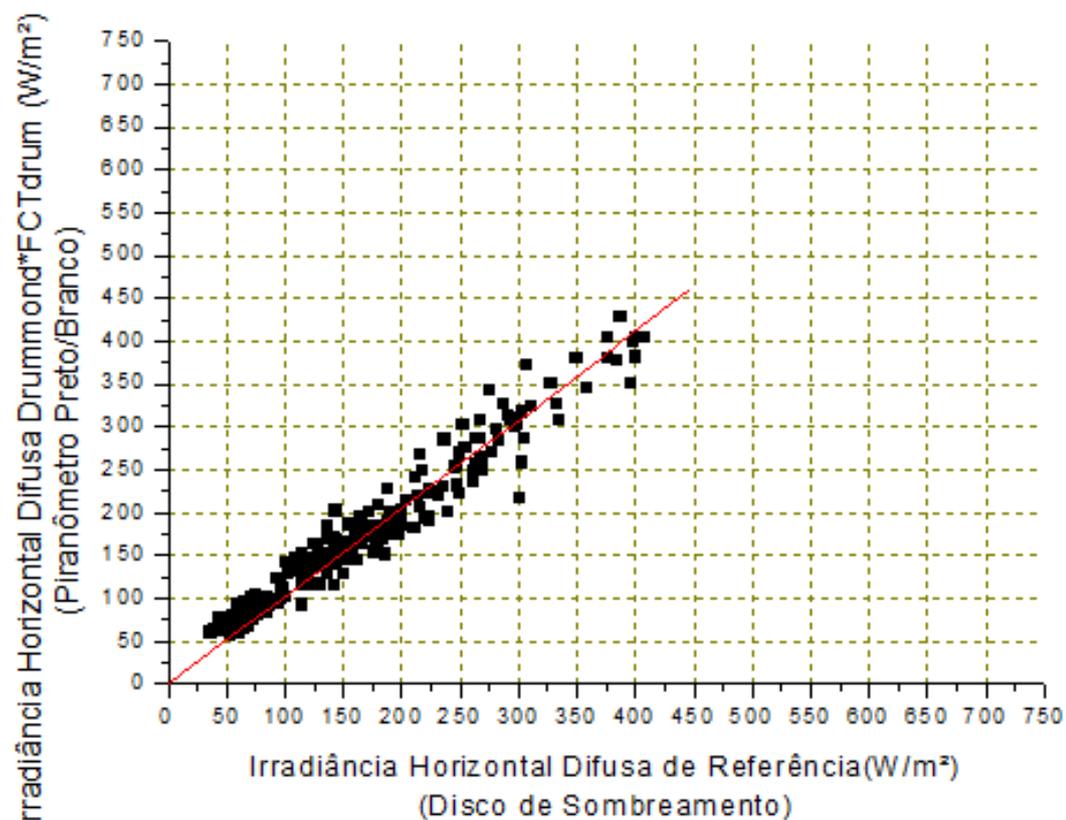


$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,16134	0,00448		
R	SD	N	P	
0,99307	16,03713	537	<0,0001	

Dia 118(2012):27 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)
 — Regressão Linear

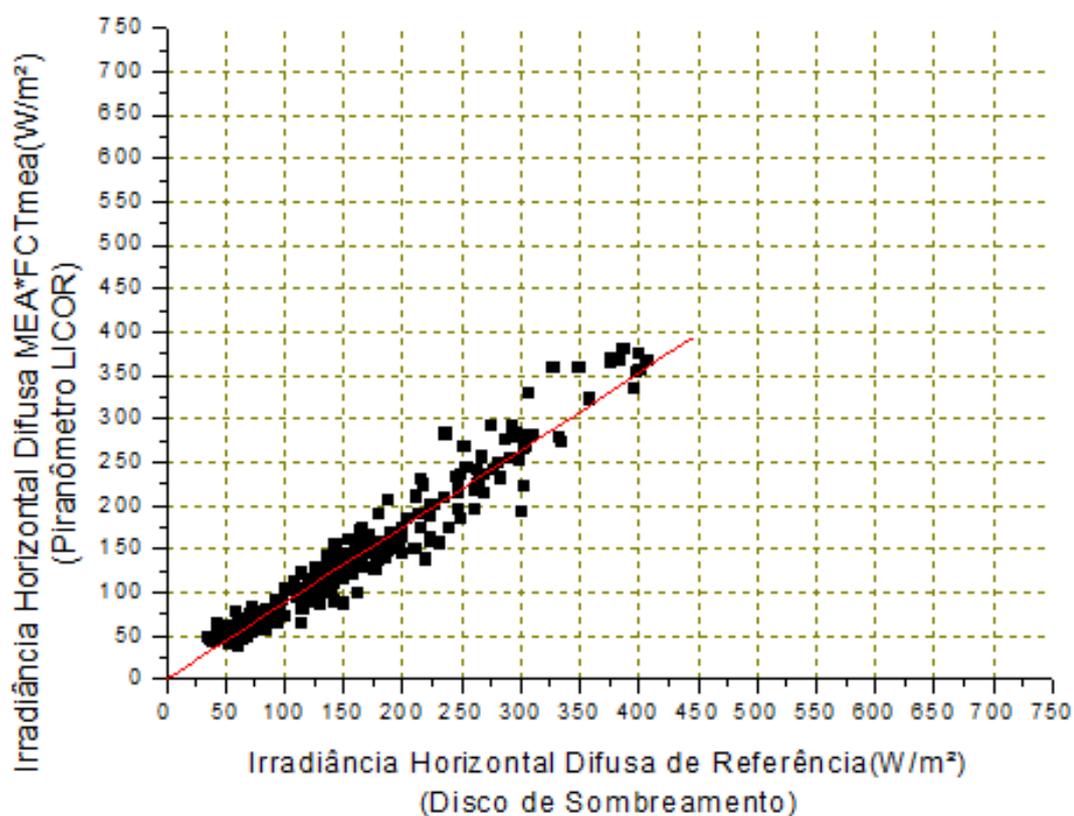


$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,02876	0,00511		
R	SD	N	P	
0,97808	20,62252	537	<0.0001	

Dia 118(2012):27 de abril

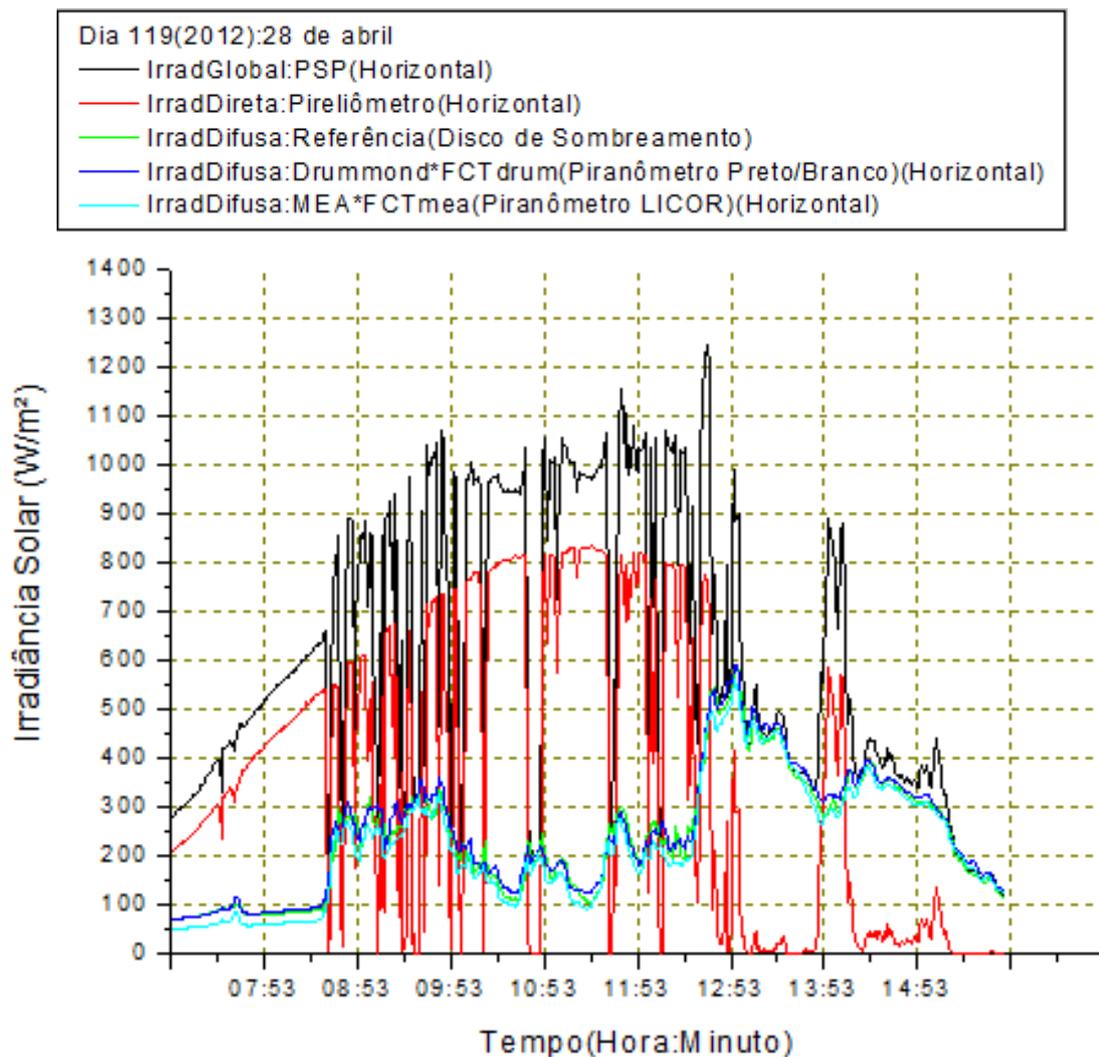
- Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ) x Irradiância Difusa de Referência(HZ)
- Regressão Linear



$$Y = B * X$$

Parameter	Ualue	Error		
B	0,88136	0,00473		
R	SD	N	P	
0,9738	19,10158	537	<0.0001	

Dia Juliano 119: 28 de abril de 2012

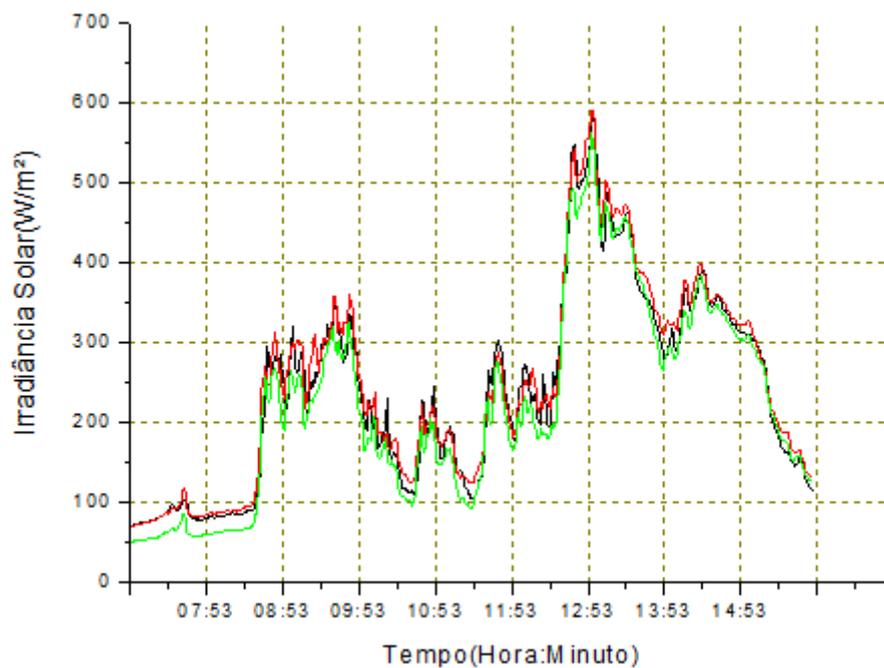


Dia 119(2012):28 de abril

— Irradiância Difusa de Referência(Disco de Sombreamento)

— Irradiância Difusa de Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

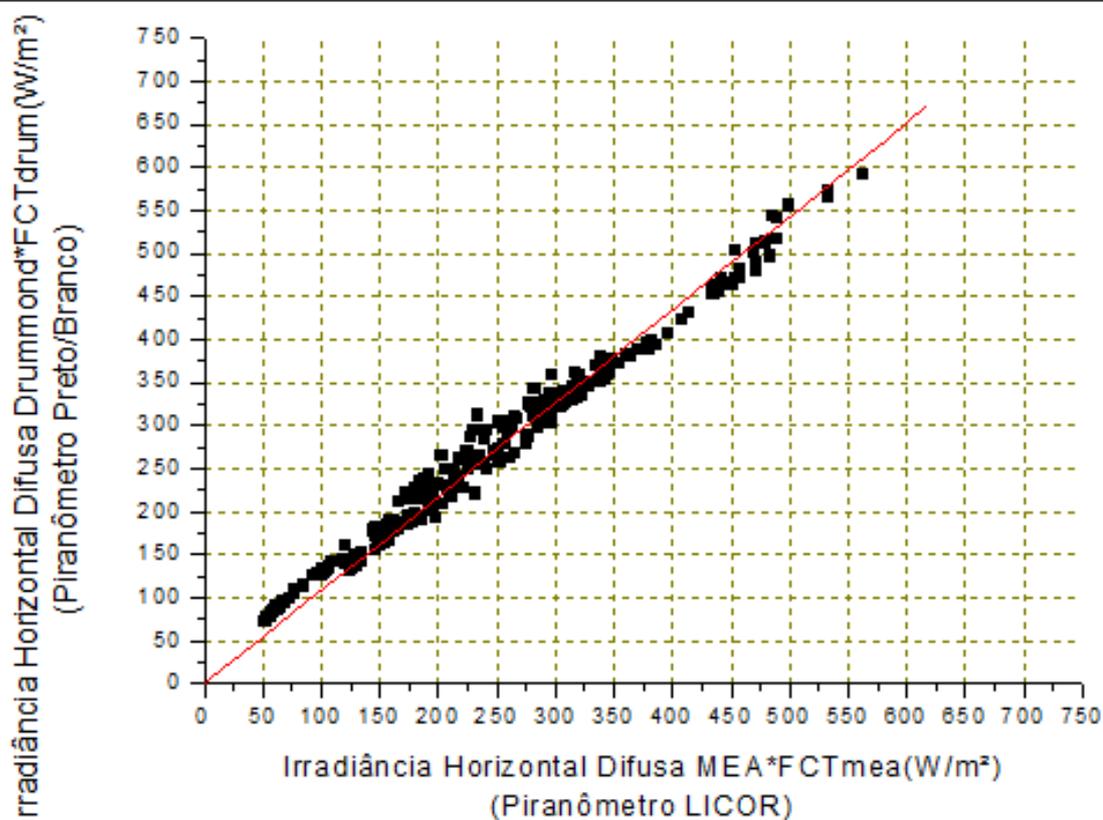
— Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 119: 28 de abril de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,61	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,105	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,14	X	1,045
			= 1,14
			= 1,19
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	604,72 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	351,26 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	240,10 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	248,16 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	223,09 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	(39,93)(16,09%)		(-32,93)(-13,27%)
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	(20,5)(8,54%)		(9,82)(4,09%)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	(35,13)(14,63%)		(-23,53)(-9,8%)

Dia 119(2012):28 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

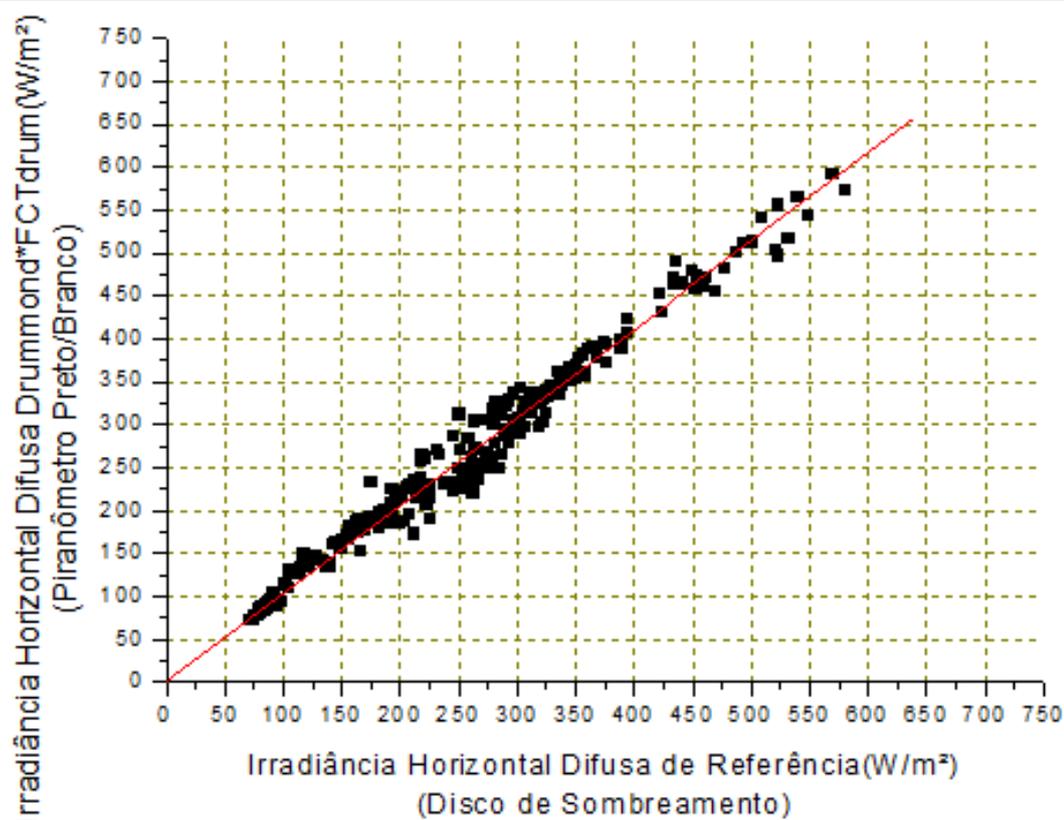


$$Y = B * X$$

Parameter	Ualue	Error	
B	1,08667	0,00296	
R	SD	N	P
0,99463	17,50308	537	<0.0001

Dia 119(2012):28 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)
 — Regressão Linear

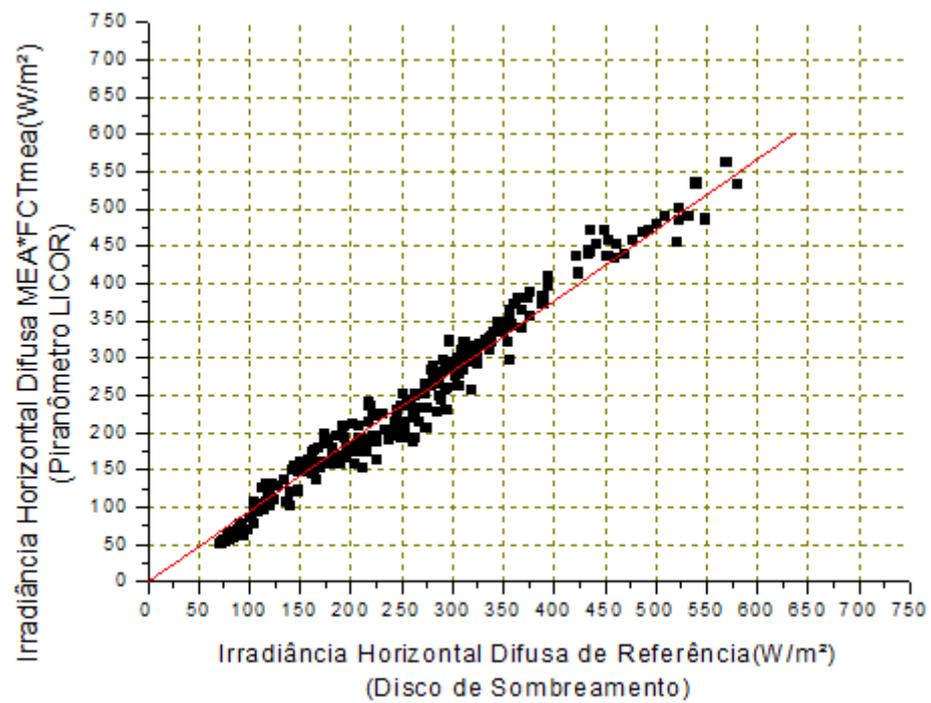


$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,02853	0,00268		
R	SD	N	P	
0,99113	16,71402	537	<0,0001	

Dia 119(2012):28 de abril

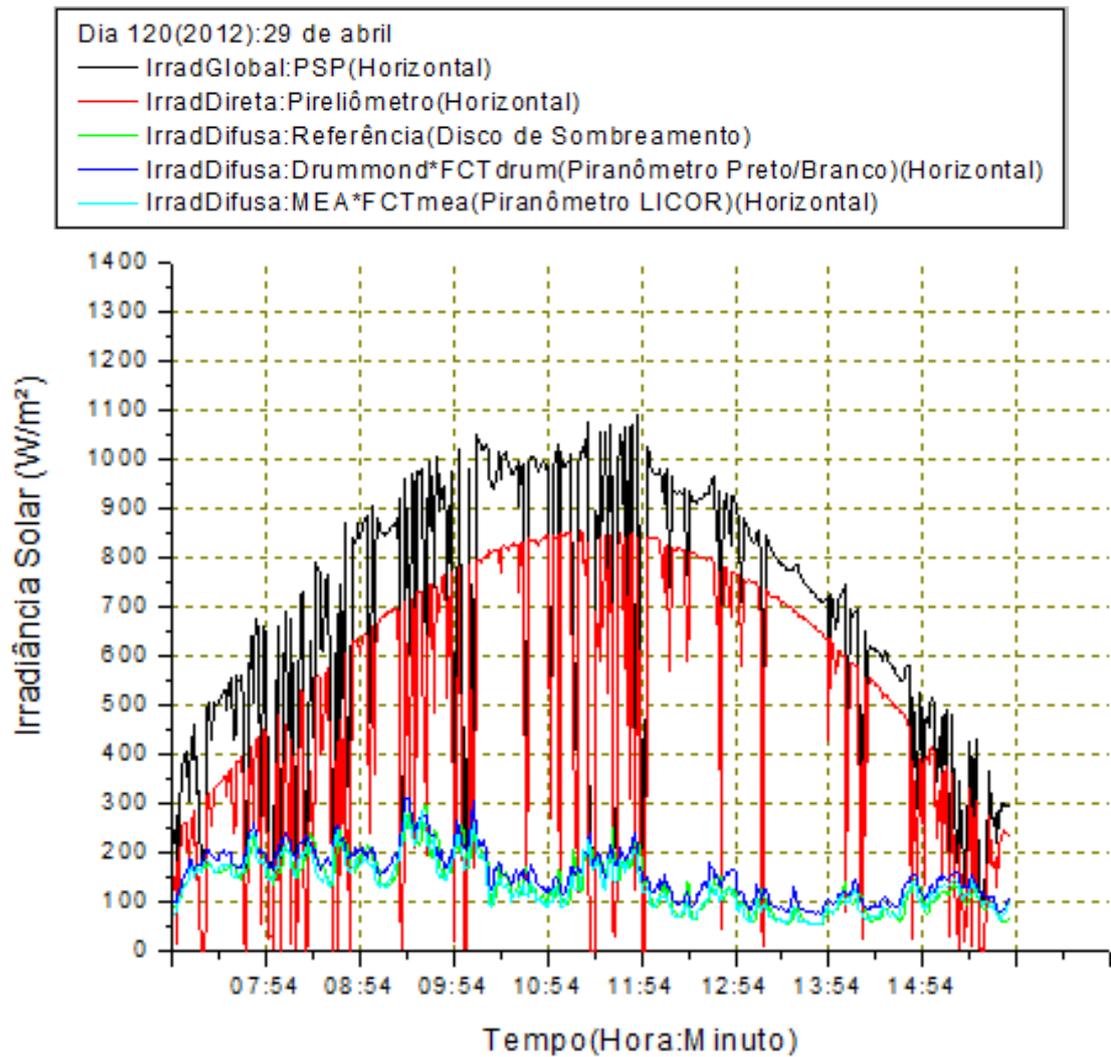
■ Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)
 — Regressão Linear



$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	0,94338	0,00322		
R	SD	N	P	
0,98849	20,11531	537	<0.0001	

Dia Juliano 120: 29 de abril de 2012

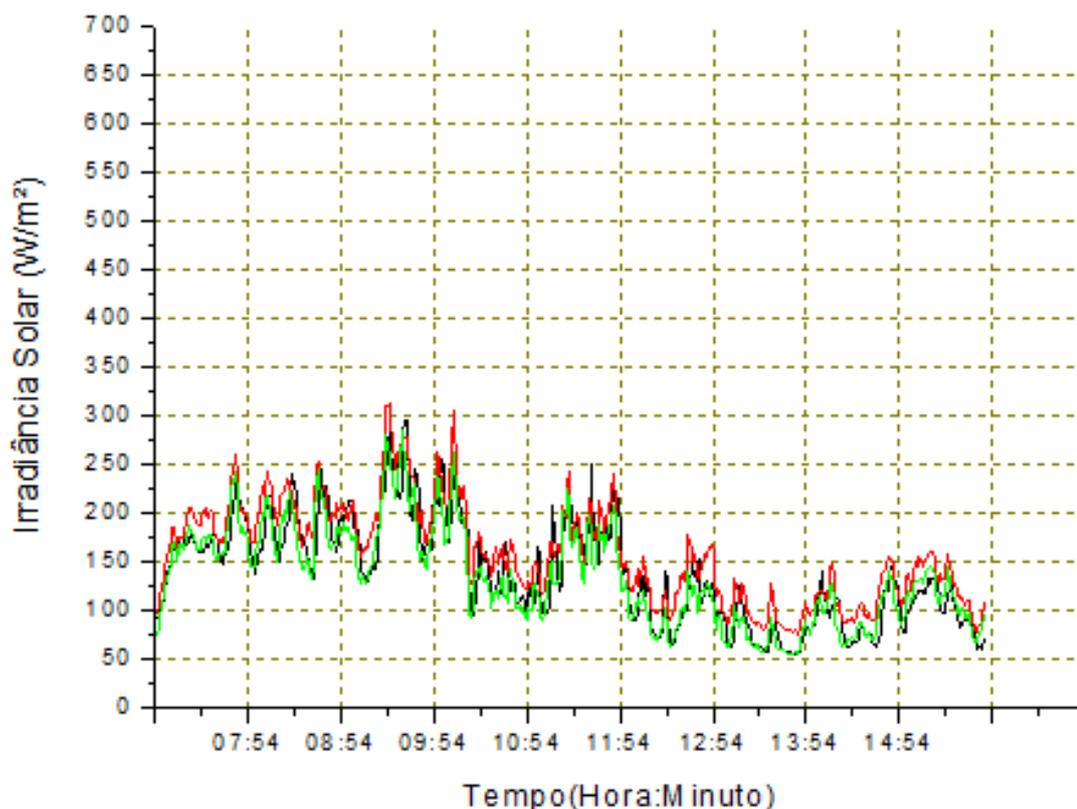


Dia 120(2012):29 de abril

— Irradiância Difusa de Referência(Disco de Sombreamento)

— Irradiância Difusa de Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

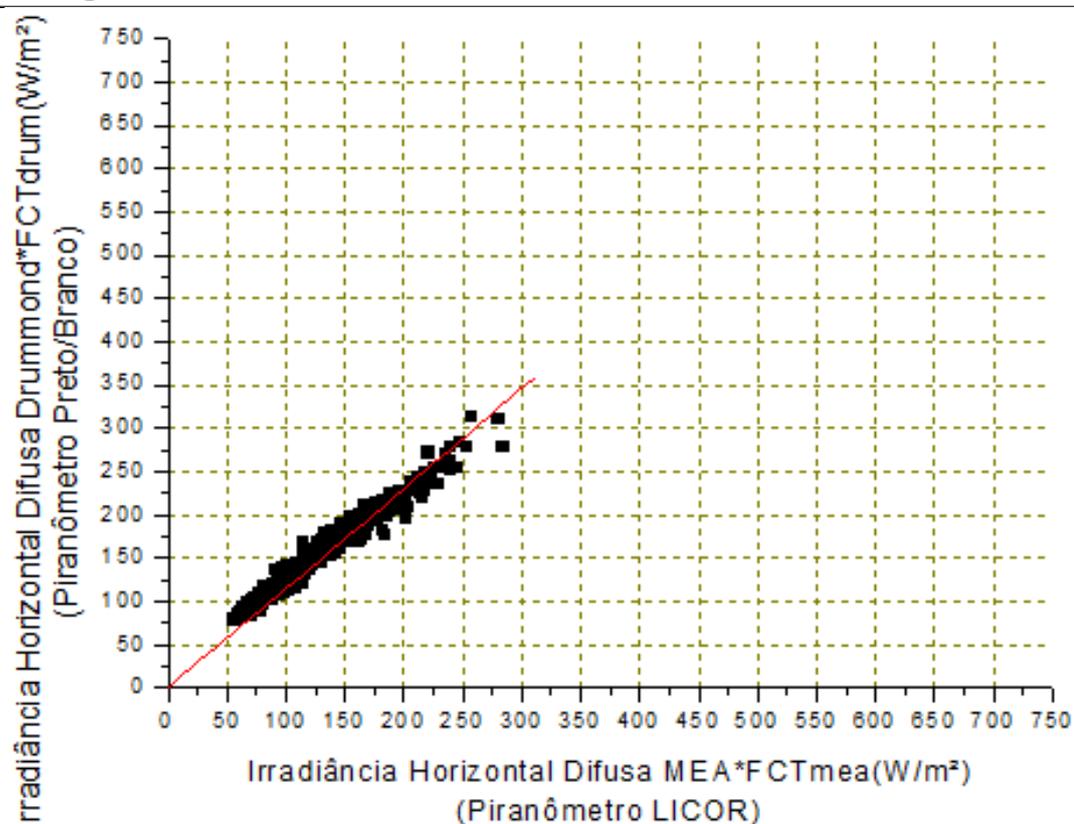
— Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 120: 29 de abril de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$		Céu claro:Kt =0,66	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,105	X	FC Anisotrópico 1,07
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,139	X	1,125
			= 1,18
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	667,64 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	508,73 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	140,05 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	159,43 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	135,61 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)		MBE(W/m ²)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Drummond)*FCTdrum	(28,63)(17,96%)		(-26,1)(-16,37%)
Idifusa(Drummond)*FCTdrum X Idifusa(Referência)	(35,42)(25,29%)		(25,42)(18,15%)
Idifusa(MEA)*FCTmea X Idifusa(Referência)	(20,31)(14,5%)		(-2,24)(-1,6%)

Dia 120(2012):29 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

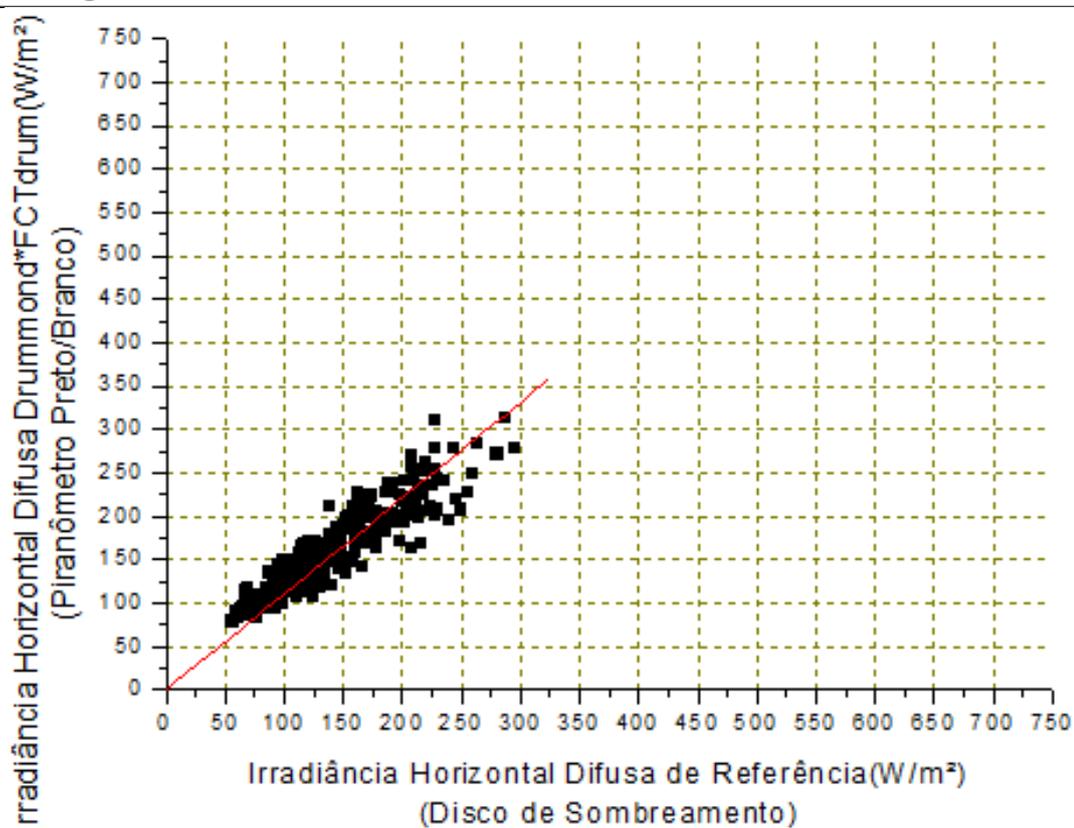


$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,152	0,0039		
R	SD	N	P	
0,98305	13,05702	536	<0.0001	

Dia 120(2012):29 de abril

- Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)
- Regressão Linear



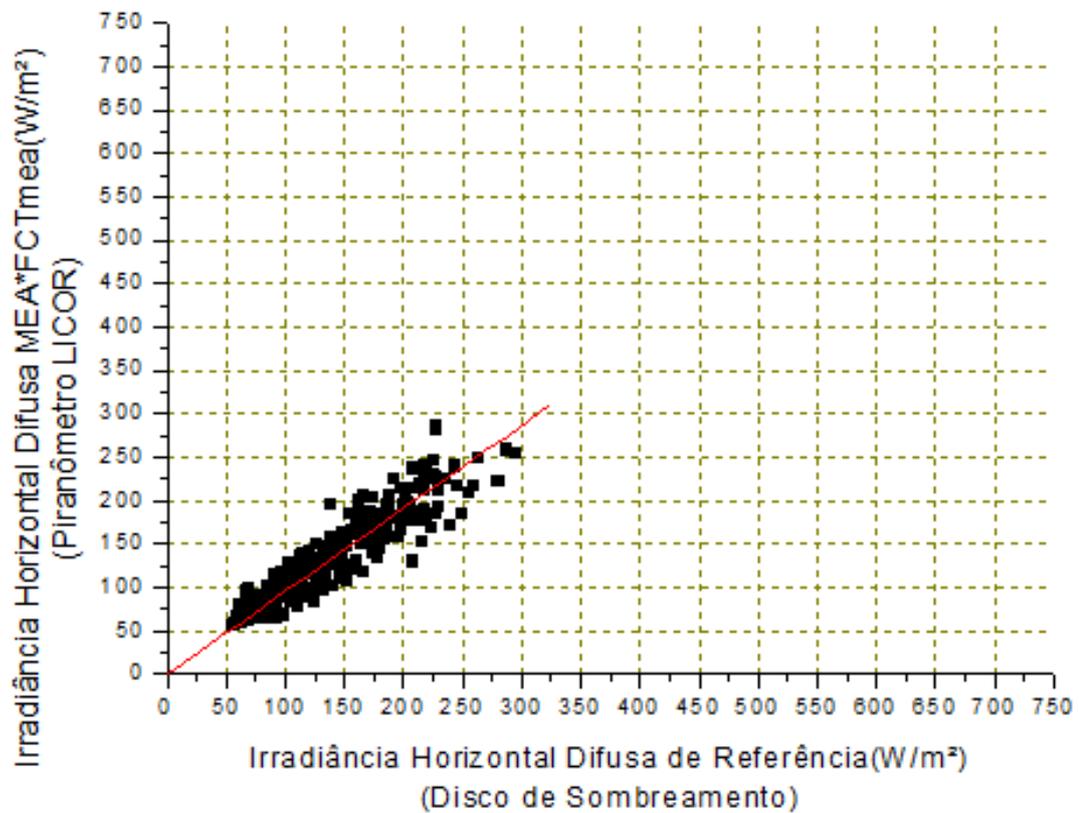
$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,10489	0,00664		
R	SD	N	P	
0,92765	23,04102	536	<0.0001	

Dia 120(2012):29 de abril

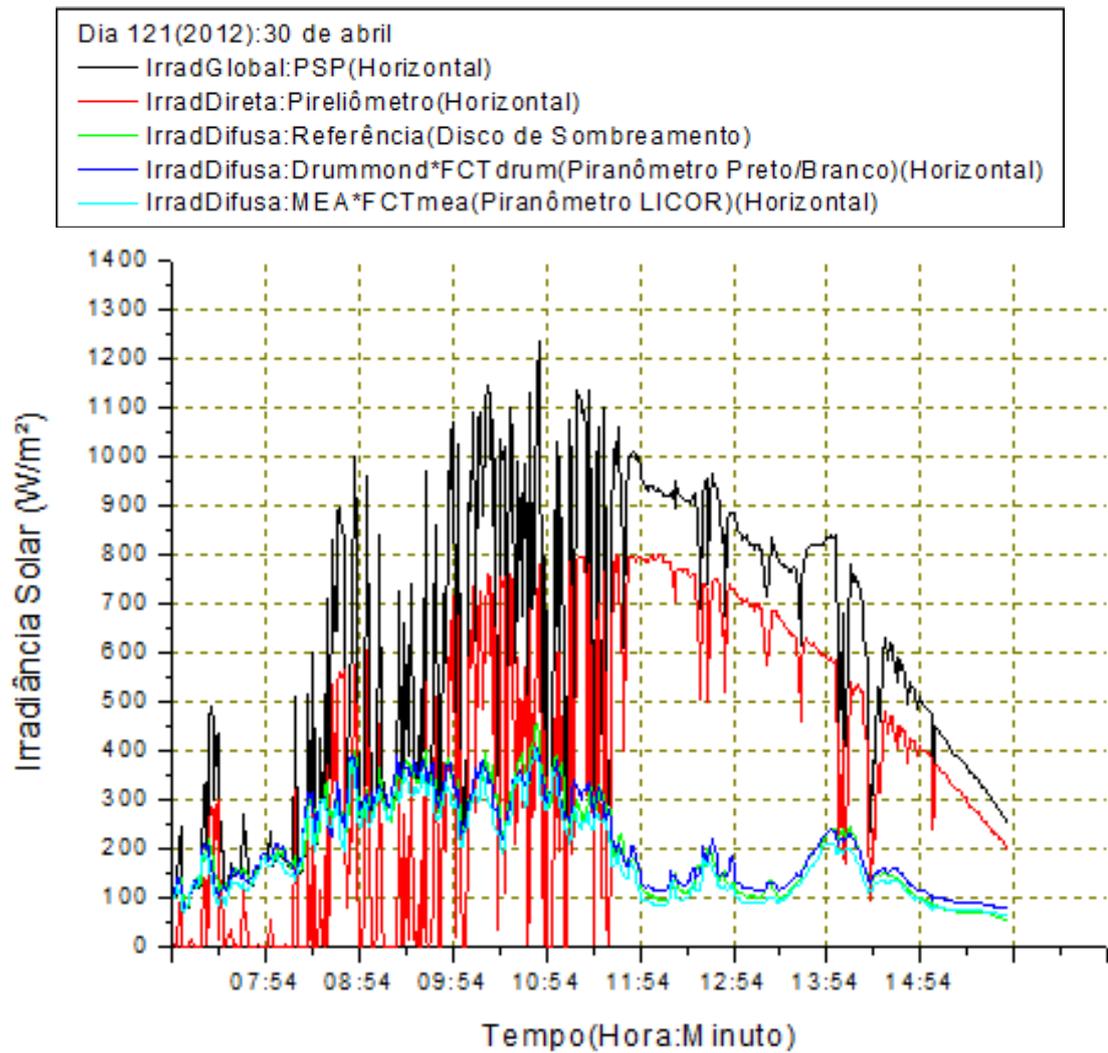
■ Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)

— Regressão Linear



$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	0,95573	0,00588		
R	SD	N	P	
0,9205	20,42373	536	<0.0001	

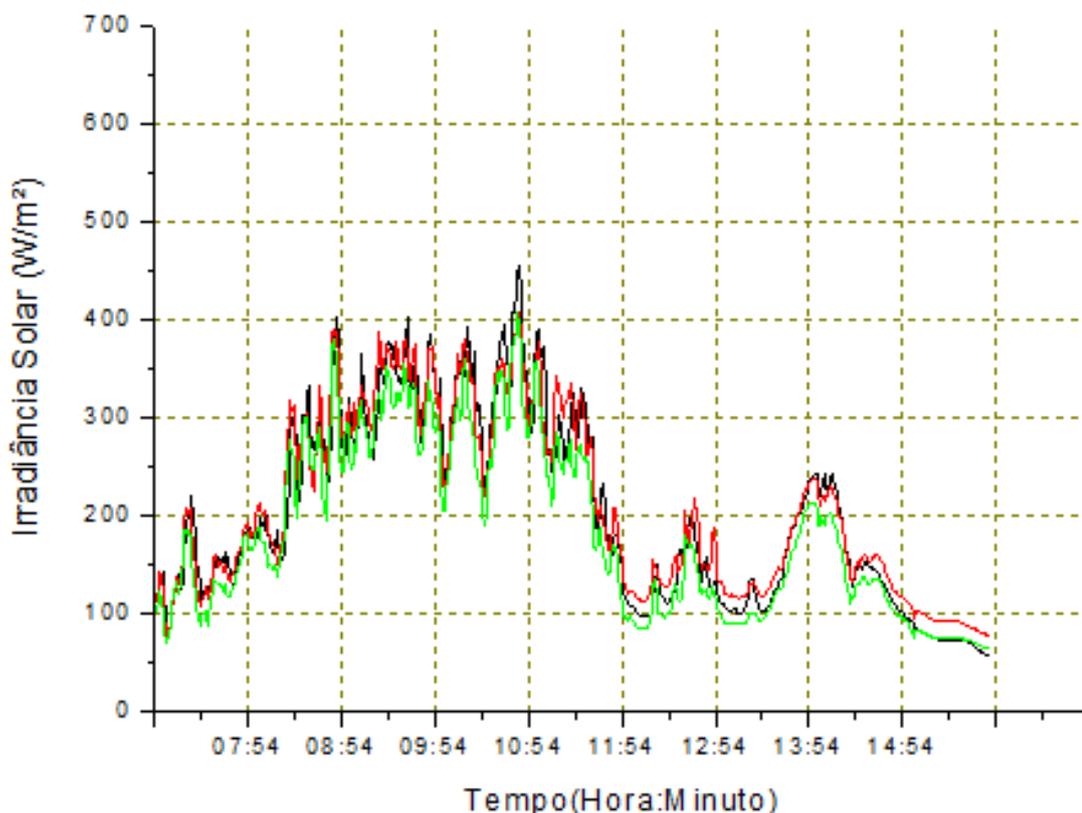
Dia Juliano 121: 30 de abril de 2012

Dia 121(2012):30 de abril

— Irradiância Difusa de Referência(Disco de Sombreamento)

— Irradiância Difusa de Drummond*FCTdrum(Piranômetro Preto/Branco)(Horizontal)

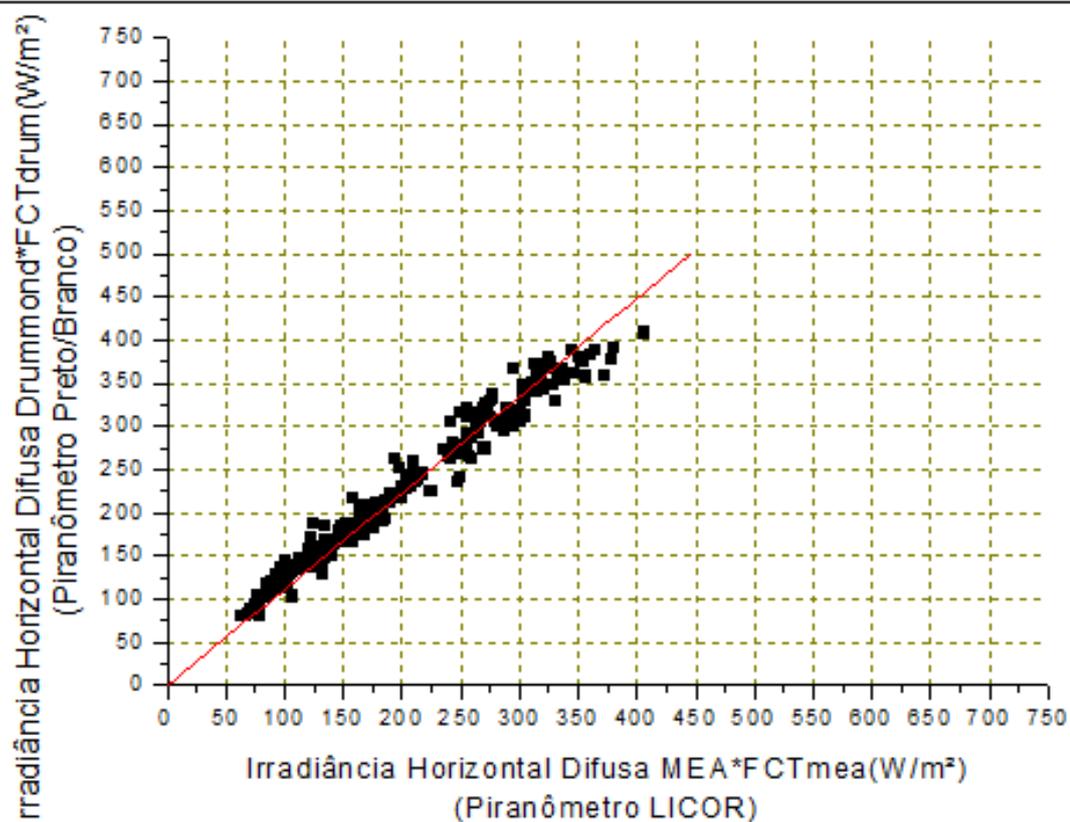
— Irradiância Difusa MEA*FCTmea(Piranômetro LICOR)(Horizontal)



Dia 121: 30 de abril de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta_z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,57	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,104	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,138	X	1,045
			= 1,14
			= 1,19
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	597,05 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	381,41 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	203,75 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	209,72 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	183,74 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)	MBE(W/m ²)	
I _d (MEA)*FCTmea X I _d (Drummond)*FCTdrum	(32,72)(15,6%)	(-29,17)(-13,91%)	
I _d (Drummond)*FCTdrum X I _d (Referência)	(27,45)(13,47%)	(12,59)(6,18%)	
I _d (MEA)*FCTmea X I _d (Referência)	(27,26)(13,38%)	(-18,17)(-8,92%)	

Dia 121(2012):30 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
 — Regressão Linear

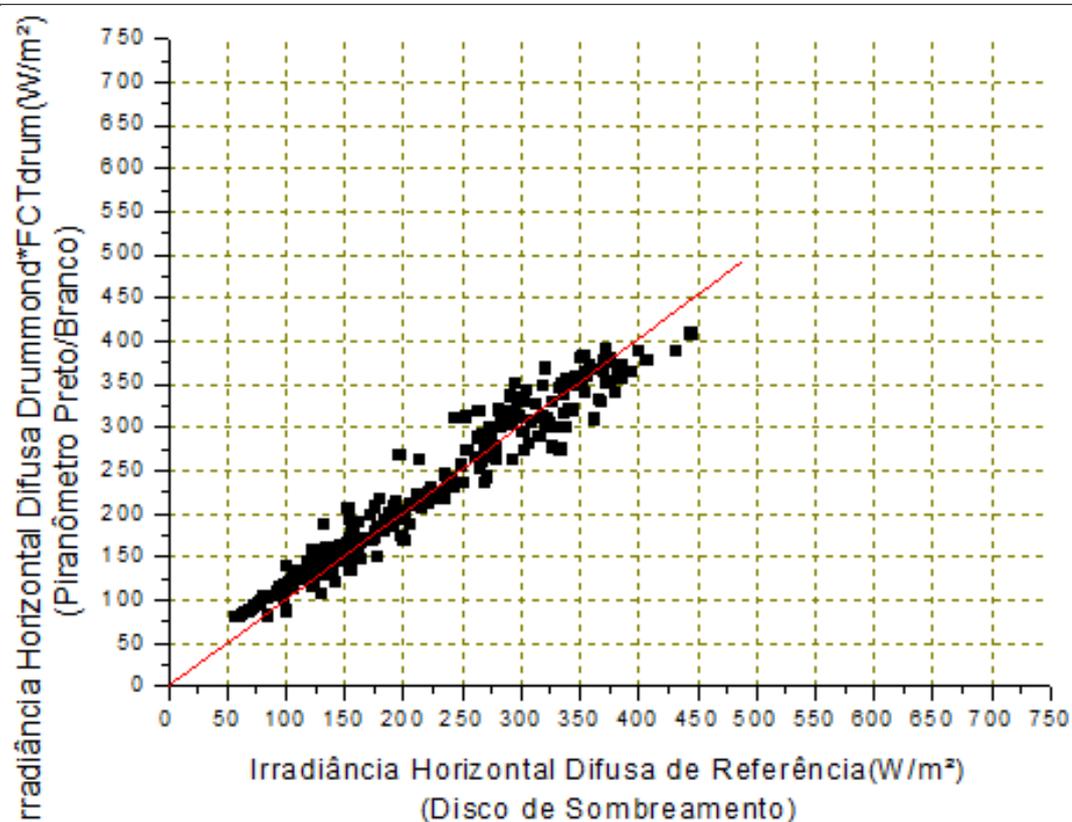


$$Y = B * X$$

Parameter	Uvalue	Error	
B	1,11978	0,00364	
R	SD	N	P
0,98746	17,17203	536	<0.0001

Dia 121(2012):30 de abril

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)
 — Regressão Linear



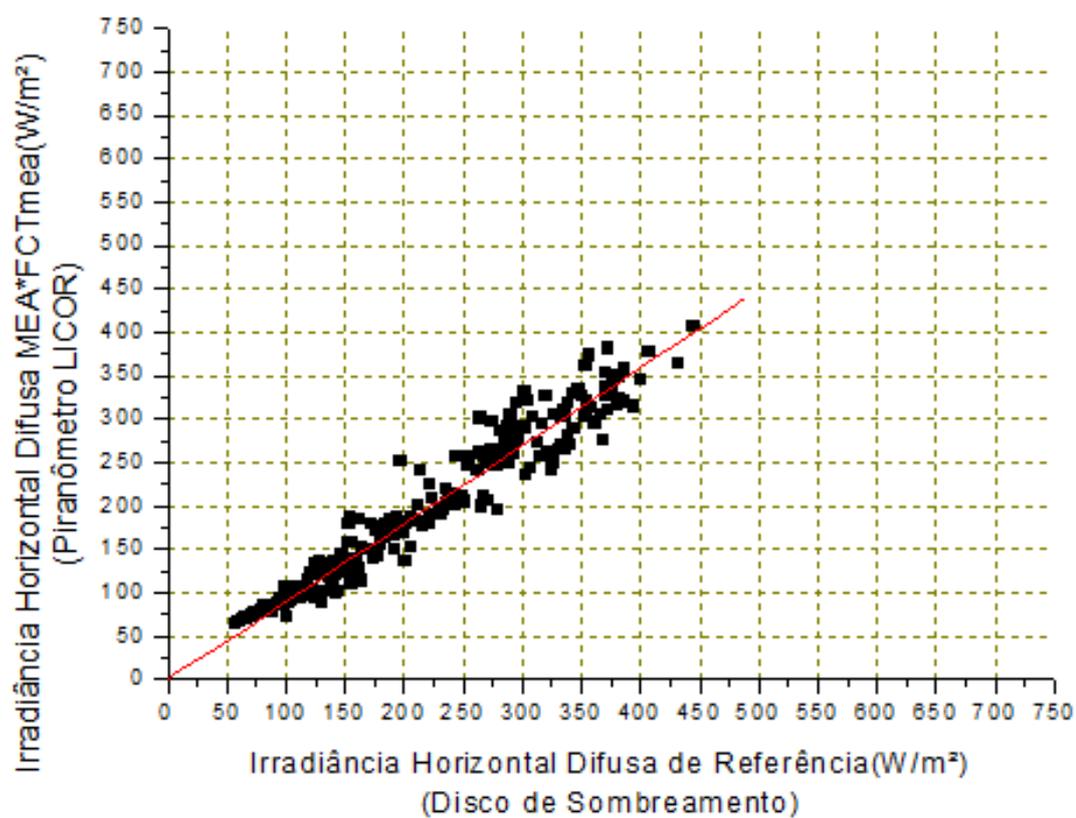
$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error	
B	1,00843	0,00416	
R	SD	N	P
0,97747	21,76917	536	<0.0001

Dia 121(2012):30 de abril

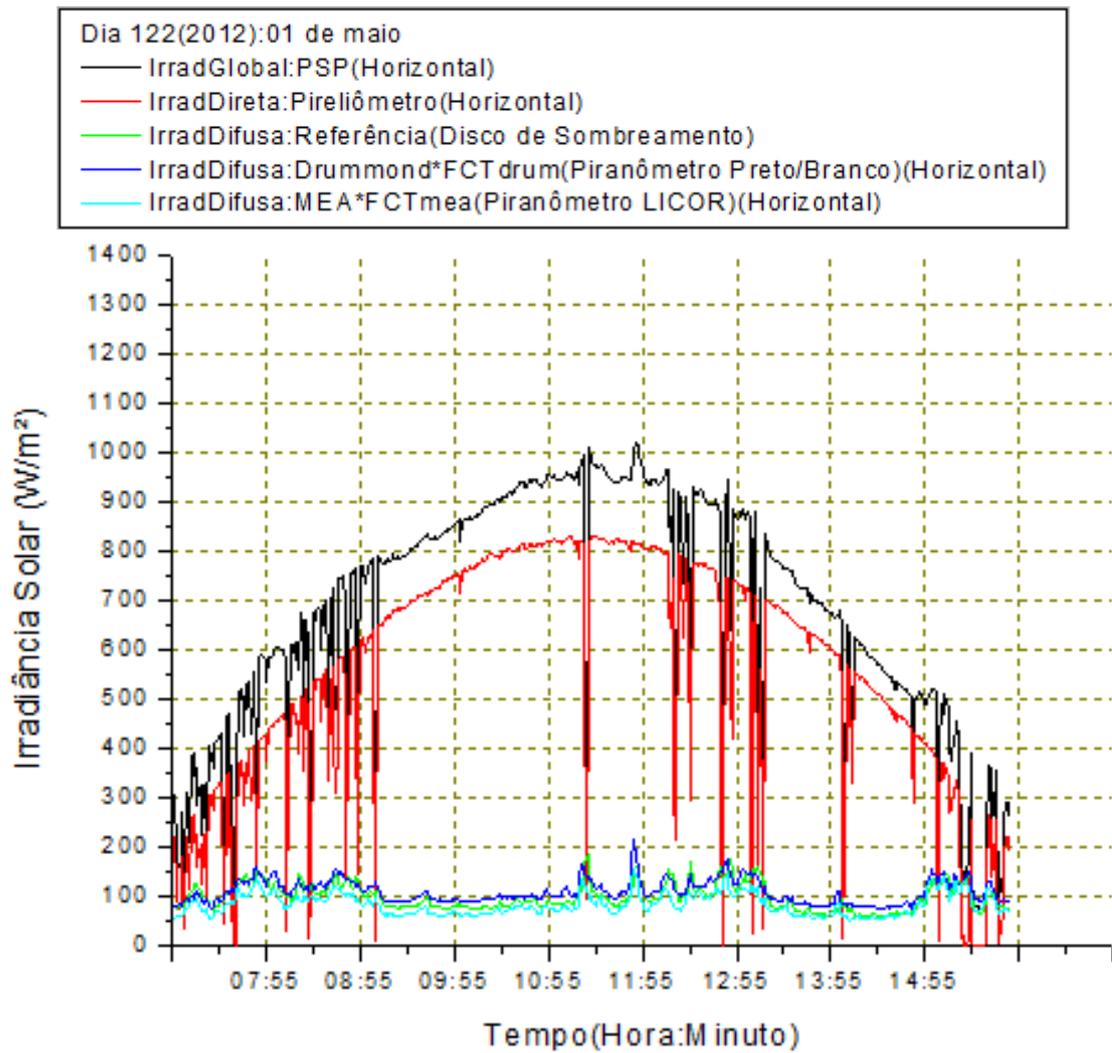
■ Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)

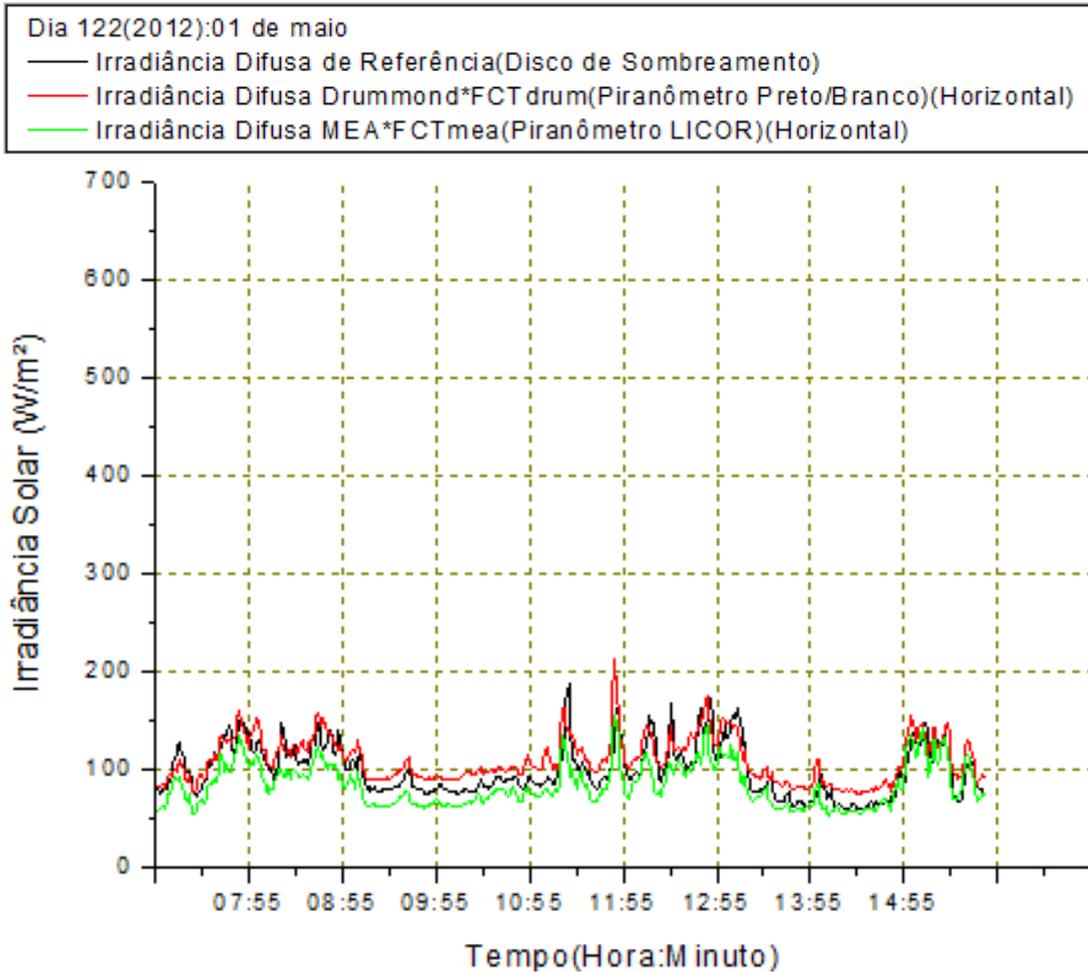
— Regressão linear



$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	0,89741	0,00397		
R	SD	N	P	
0,9723	20,79198	536	<0.0001	

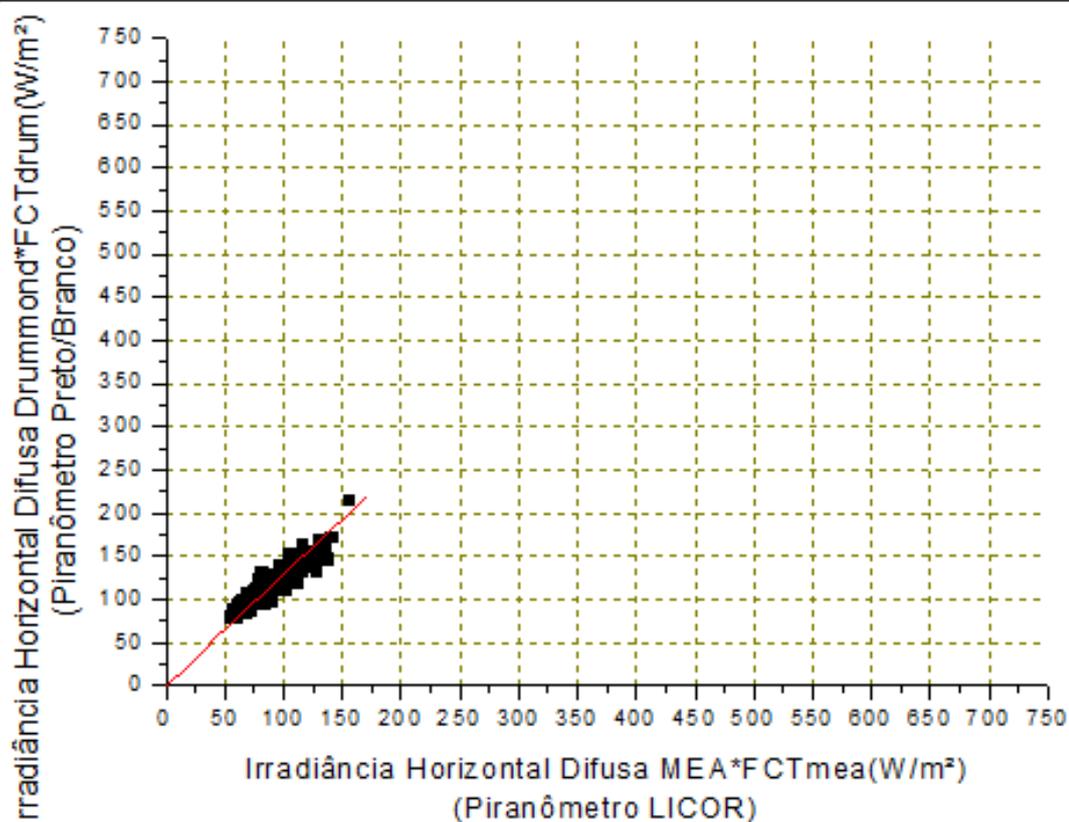
Dia Juliano 122: 01 de maio de 2012



Dia 122: 01 de maio de 2012			
Dados armazenados a cada minuto - $\Theta z=70^\circ$		Céu parcialmente nublado:Kt =0,64	
Fator de Correção Total Drummond(FCTdrum)	FC Isotrópico 1,103	X	FC Anisotrópico 1,03
Fator de Correção Total MEA(FCTmea)	1,136	X	1,045
			= 1,14
Valor Médio da Radiação Horizontal Global =>I _g	671,8 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Direta =>I _b	552,35 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Referência =>I _{d,ref}	99,73 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa de Drummond*FCTdrum =>I _{d,drumm}	110,25 W/m ²		
Valor Médio da Radiação Horizontal Difusa MEA*FCTmea =>I _{d,mea}	84,85 W/m ²		
	RMSE(W/m ²)	MBE(W/m ²)	
I _{difusa} (MEA)*FCTmea X I _{difusa} (Drummond)*FCTdrum	(26,91)(24,41%)	(-26)(-23,58%)	
I _{difusa} (Drummond)*FCTdrum X I _{difusa} (Referência)	(17,68)(17,73%)	(12,62)(12,65%)	
I _{difusa} (MEA)*FCTmea X I _{difusa} (Referência)	(17,65)(17,7%)	(-14,03)(-14,07%)	

Dia 122(2012):01 de maio

- Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ)
- Regressão Linear



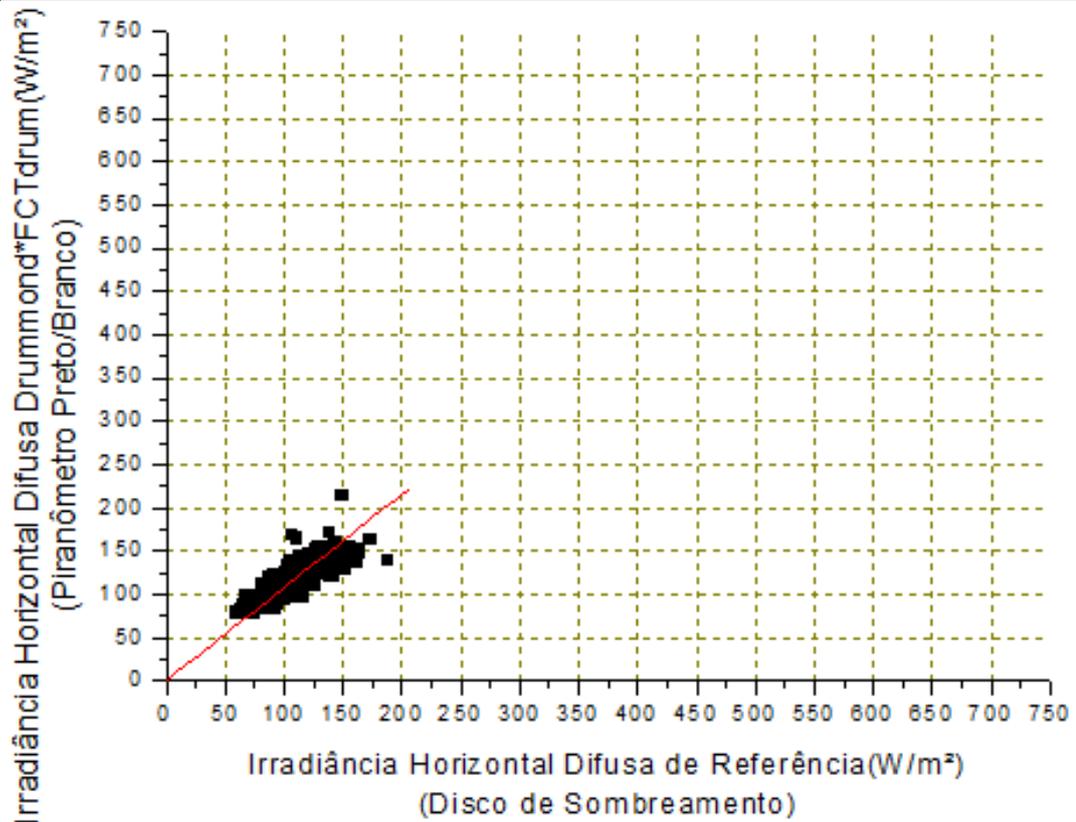
$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,28121	0,00467		
R	SD	N	P	
0,95002	9,45364	534	<0.0001	

Dia 122(2012):01 de maio

■ Irradiância Difusa Drummond*FCTdrum(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)

— Regressão Linear

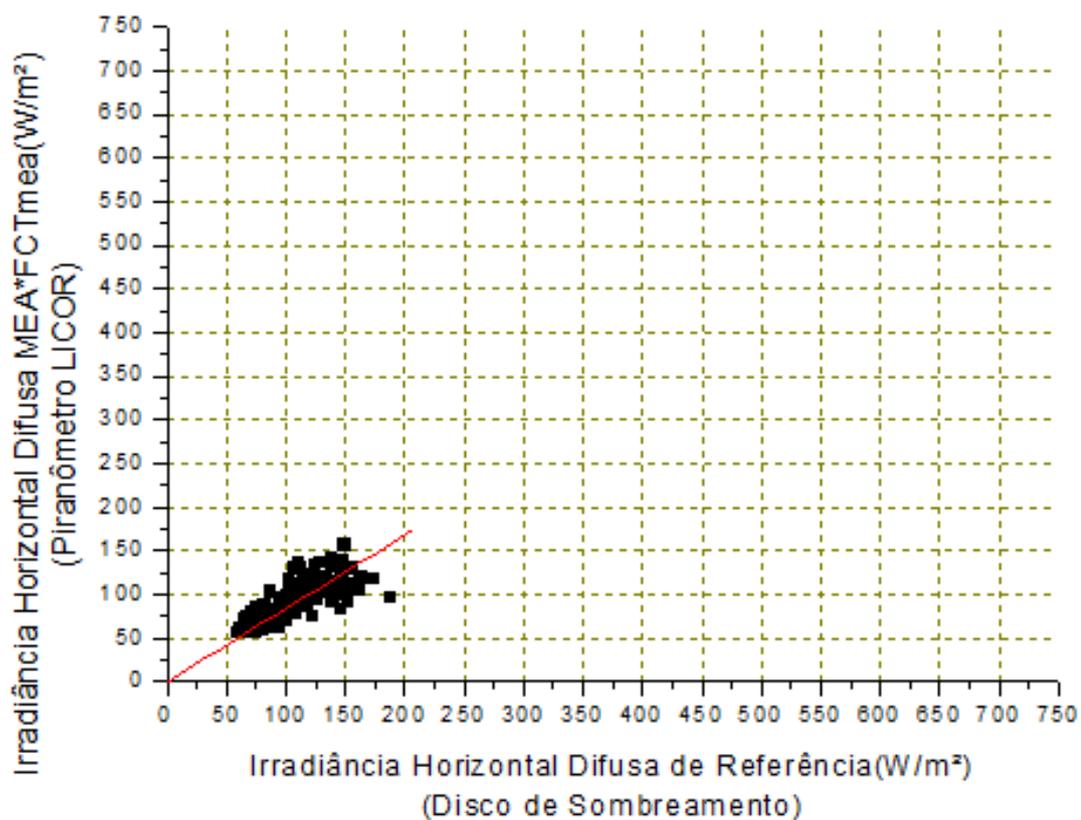


$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	1,08371	0,00584		
R	SD	N	P	
0,87691	13,91496	534	<0.0001	

Dia 122(2012):01 de maio

- Irradiância Difusa MEA*FCTmea(HZ) X Irradiância Difusa de Referência(HZ)
- Regressão Linear



$$Y = B * X$$

Parameter	Value	Error		
B	0,84119	0,00509		
R	SD	N	P	
0,8461	12,12949	534	<0.0001	