

MÉTODO DE PREVISÃO DE IRRADIÂNCIA SOLAR POR IMAGENS DE CÂMERA DE SEGURANÇA

André Barros Togawa – andretogawa@gmail.com

Mario Benjamim Baptista de Siqueira – mariosiqueira@unb.br
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A crescente demanda mundial por energia elétrica estimula o uso da energia solar, porém a atual tecnologia só permite que 20% da rede elétrica utilize esse tipo de energia. Neste trabalho foi realizada uma adaptação do método de previsão de irradiância solar direta normal através do rastreamento de nuvens. Foi utilizada para capturar imagens do céu a câmera de segurança Vivotek FE8171V no lugar do equipamento TSI-440, reduzindo o custo de equipamento em 25 vezes. Adaptações foram realizadas nos programas de localização do sol, planificação das imagens e identificação das nuvens. Os resultados alcançados foram satisfatórios com uma habilidade de previsão acima de 20%, porém o programa de identificação de nuvens ainda necessita de modificações.

Palavras-chave: Energia solar, Previsão de irradiância, Câmera de Segurança, Rastreamento de nuvens

1. INTRODUÇÃO

O grande problema da utilização da energia eólica e solar é que elas dependem das condições meteorológicas. Ambas as formas de produção de energia utilizam uma fonte barata e abundante, o vento e o sol, entretanto essas duas fontes naturais de energia não são produzidas continuamente e nem com uma potência constante. Os ventos variam de intensidade, e a energia fornecida pelo sol varia em decorrência da rotação da Terra e da presença das nuvens, fazendo com que haja uma geração intermitente de energia elétrica. Essa geração inconstante resulta em grave problema para a estabilidade da rede elétrica, podendo danificar diversos equipamentos eletrônicos. Com a tecnologia atual é possível manter a estabilidade necessária da rede elétrica com no máximo 20% de fontes intermitentes ligadas a ela.

A motivação desse trabalho é a necessidade de se prever, para conversão de energia solar, variações de energia decorrentes das condições meteorológicas, causadas, principalmente, pela movimentação das nuvens. A partir de uma correta estimativa da irradiação solar que chega aos painéis, coletores e espelhos solares é possível acionar dispositivos secundários para suprir a futura queda de carga e com isso estabilizar a rede, fator de extrema importância para incorporação destas tecnologias.

O objetivo desse trabalho é adaptar o método de previsão de irradiação solar através do rastreamento de nuvens desenvolvido por Marquez e Coimbra (2012), que utiliza o equipamento “TSI-440 Total Sky Imager”. Nesse projeto será utilizado a câmera de segurança “VivoTek FE8171V” (Fig. 1.b).

2. MÉTODOS DE PREVISÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR

Os métodos padrões de geração de energia elétrica utilizam a queima de combustíveis fósseis e a energia nuclear para gerar energia elétrica de um modo constante. A única variação de eletricidade na rede elétrica, nesses casos, é causada pelas flutuações da demanda (Lew, 2010). Porém outras fontes que dependem da energia solar exibem um alto nível de variabilidade o que induz flutuações na distribuição elétrica. Para facilitar a utilização da energia solar ligada a rede elétrica, é necessário previsões com qualidade em diferentes horizontes de tempo (Inman et al., 2013).

As previsões para diferentes horizontes de tempo são úteis para variadas formas de energia solar. Os métodos mais comuns de previsão de irradiação solar utilizam os seguintes horizontes de tempo: 1, 5, 15 e 30 minutos, 1 a 6 horas e 1 a 3 dias à frente.

Como a irradiância solar prevista pelos modelos, representado por \hat{I}_t [W/m²], depende da geografia do local, época do ano e condições meteorológicas, existe uma dificuldade para comparar e verificar a qualidade desses modelos. Vários métodos tradicionais para caracterizar a qualidade do modelo são utilizados como o Coeficiente de Determinação (R^2), Erro Médio Absoluto (MAE) e o Coeficiente de Correlação (ρ).

Recentemente a Agência Internacional de Energia, começou a recomendar para a divulgação de resultados de modelos de irradiação, a utilização de três métricas de validação: Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), Erro Médio do Viés (MBE) e Integral de Kolmogorov-Smirnov (KSI), Eq. (1), (2) e (3) respectivamente. O RMSE é uma medida da média do espaçamento dos erros, MBE é uma medida da média do viés do modelo e o KSI é utilizado para quantificar a habilidade do modelo em reproduzir distribuições estatísticas observadas (Inman et al., 2013). Onde N é o número de previsões, I_t [W/m²] é o valor de irradiância medida e D_n é a diferença entre duas funções de distribuição.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{I}_t - I_t)^2} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{I}_t - I_t) \quad (2)$$

$$KSI = \int_{x_{min}}^{x_{max}} D_n dx \quad (3)$$

Outra métrica proposta por Marquez e Coimbra (2013) para avaliar a performance do algoritmo de previsão, denominada por eles de “habilidade de previsão” (s), pode ser visto na Eq. (4),

$$s = 1 - \frac{U}{V} \quad (4)$$

Em que U e V estão representados na Eq. (5) e (6)

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(\frac{\hat{I}_t - I_t}{I_t^{clr}} \right)^2} \quad (5)$$

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (k_{t+\Delta t} - k_t)^2} \quad (6)$$

onde I_t^{clr} é a irradiância solar calculada por um modelo de céu limpo, k_t é o índice de céu limpo (definido no tópico 2.2) e $k_{t+\Delta t}$ é o índice de céu limpo a um incremento de tempo a frente.

Quando $s = 1$ indica que a irradiação solar é perfeitamente previsível e quando $s = 0$ a variabilidade da irradiação solar não é de nenhuma forma previsível. Se o valor $s < 0$ o modelo de previsão de irradiação solar atua de forma pior que uma previsão aleatória. Logo a habilidade de previsão “ s ” dos modelos de irradiação solar devem estar entre 0 e 1 e quanto maior o valor, melhor a previsão.

Uma maneira aproximada de se medir o valor de “ s ” é utilizando a Eq. (7), essa forma pode ser utilizada quando só se têm disponíveis os valores de RMSE do modelo de previsão e $RMSE_p$ do método persistente (definido no tópico 2.2) do mesmo período.

$$s \cong 1 - \frac{RMSE}{RMSE_p} \quad (7)$$

2.1 Índice de céu limpo e método persistente

Um parâmetro que é frequentemente utilizado para previsão de irradiação solar em solo é o índice de céu limpo, k_t , que é normalizado. Ele é definido como a razão entre o valor de irradiação medida (I_t) e o modelo de irradiação para céu limpo no solo (I_t^{clr}), Eq. (8), (Inman et al., 2013).

$$k_t = \frac{I_t}{I_t^{clr}} \quad (8)$$

O método persistente de previsão de irradiação solar é o método mais simples de ser implementado e por isso é muitas vezes utilizado como parâmetro base para avaliar os outros métodos de previsão. Ele consiste em dizer que as condições atuais de irradiação solar irão persistir e terá o mesmo valor há um tempo à frente, ou seja, o índice de céu limpo a um $t+\Delta t$ será igual ao índice de céu limpo no tempo t , Eq. (9),

$$k_{t+\Delta t} = k_t = \frac{I_t}{I_t^{clr}} \quad (9)$$

onde Δt é o horizonte de tempo para previsão. Esse tipo de previsão depende do índice de céu limpo que pode assumir diversos valores dependendo do modelo utilizado para calcular I_t^{clr} . Uma característica desse modelo é que ele se adapta muito bem quando não há nuvens no céu, porém apresenta grandes erros de previsão quando ocorrem rápidas variações da irradiação solar, devido à passagem de nuvens. (Inman et al., 2013).

2.2 Rastreamento de nuvens

O objetivo desse trabalho é adaptar o método de previsão de irradiação solar através do rastreamento de nuvens desenvolvido por Marquez e Coimbra (2012), que utiliza o equipamento “TSI-440 Total Sky Imager” para uma câmera de segurança “VivoTek FE8171V” (Fig. 1). Isso representa uma redução significativa de custos, de US\$15.000,00 para US\$600,00, o que permitirá a popularização da tecnologia.

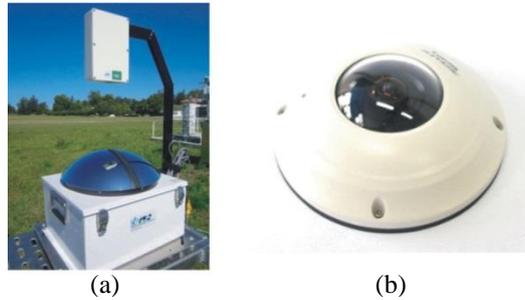


Figura 1 - (a) Total Sky Imager da Yesinc (imagem disponível em <<http://maddenjulianconversation.blogspot.com.br/>>). (b) Camera da Vivotek FE8171V (imagem disponível em <<http://www.vivotek.com/>>).

Imagens da câmera de segurança “Vivotek FE8171V”, coletadas pelo grupo de pesquisa Coimbra Energy Group do professor Carlos F.M. Coimbra localizado na Universidade da Califórnia San Diego foram utilizadas. As imagens utilizadas foram a da câmera localizada em Folsom-CA nos Estados Unidos, que se assemelham as formações de nuvens que ocorrem no Centro-Oeste durante a época chuvosa. As imagens possuem uma resolução de 1536 x 1536 pixels, com três camadas de cores, vermelho, verde e azul com 8 bits (256 cores) por cor. Observando as imagens percebe-se um ponto preto em cima do sol, esse ponto é criado pela câmera em um ponto de ponto de saturação máxima da imagem que se localiza próximo do centro do sol (Fig. 2.a), quando o sol esta encoberto pelas nuvens esse ponto de saturação não aparece (Fig. 2.b).

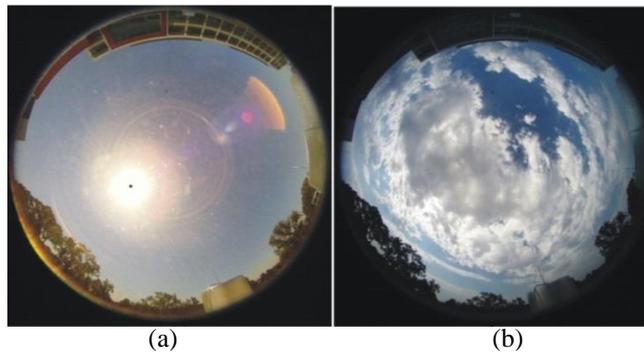


Figura 2 - (a) Ponto de saturação em cima do sol criado pelo software da câmera. (b) Ponto não aparente quando o brilho não é intenso. (fonte: Coimbra Energy Group)

O primeiro passo é a localização do sol nas imagens. Foi desenvolvido um programa que determina a posição do sol na imagem utilizando apenas o horário que a imagem foi registrada e as coordenadas geográficas (latitude e longitude) da câmera. Com esses dois dados é possível encontrar o ângulo zenital e o ângulo de azimute do sol. Outro dado importante que se necessita saber é em que direção à parte superior da câmera está apontada e se ela está perfeitamente plana em relação ao horizonte.

Devido à lente “olho de peixe” contida na câmera utilizada para obtenção de imagens 360°, as imagens registradas apresentam uma distorção. Devido à distorção da imagem, a posição do sol utilizando os ângulos zenital e azimute não podem ser utilizados diretamente para localizar o sol, necessitando de uma correção. Caso não houvesse distorção na imagem e se a câmera estivesse perfeitamente alinhada com o norte e sobre uma superfície plana, a posição do sol (x,y) poderia ser calculada conforme a Eq. (10) e (11),

$$x = r \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\alpha) + c_{\text{imx}} \quad (10)$$

$$y = r \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{cos}(\alpha) + c_{\text{imy}} \quad (11)$$

onde θ e α são os ângulos zenital e azimute respectivamente, c_{imx} e c_{imy} são as coordenadas do centro da imagem considerando a origem o ponto inferior a esquerda e r é o raio do campo de visão.

A lente “olho de peixe” faz com que os objetos muito distantes aparentam estarem mais próximos do que realmente estão. Para corrigir esse efeito, a variável r na Eq. (10) e (11) foi substituído por uma função “ $f(d)$ ” que varia conforme a distancia sol “ d ” em relação centro da imagem (c_{imx} , c_{imy}) Eq. (12) e (13).

$$x_r = f(d) \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\alpha) + c_{\text{imx}} \quad (12)$$

$$y_r = f(d) \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{cos}(\alpha) + c_{\text{imy}} \quad (13)$$

A função $f(d)$ pode ser observada na Eq. (14),

$$f(d) = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot d) + a_3 \cdot \exp(a_4 \cdot d) \quad (14)$$

onde a_1 , a_2 , a_3 e a_4 são coeficientes obtidos através da interpolação entre o valor real de “ $f(d)$ ” e a distância obtida pela Eq. (15),

$$d = \sqrt{(\text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\alpha))^2 + (\text{sen}(\theta) \cdot \text{cos}(\alpha))^2}. \quad (15)$$

Para obtenção do valor real que a função $f(d)$ deve assumir para corrigir a posição do sol, foi criado um programa em que o usuário manualmente seleciona o centro do sol obtendo-se assim $f(d)$ real. Foram utilizadas 70 imagens de diferentes dias e horários para obter os resultados apresentado na Fig. 3.

A partir dos resultados obtidos foi feita uma interpolação exponencial para obtenção das constantes a_1 , a_2 , a_3 e a_4 . A interpolação que mais se aproximou dos pontos tendo um erro menor que 2% foi uma interpolação exponencial utilizando dois termos, Eq. (14).

Caso as câmeras instaladas não estejam alinhadas com o norte verdadeiro, se faz necessário uma correção, adicionando uma variável β na Eq. (11) e (12), em que β é o ângulo entre o norte verdadeiro e o eixo y na imagem, Eq. (16) e (17).

$$x_r = f(d) \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{sen}(\alpha + \beta) + c_{\text{imx}} \quad (16)$$

$$y_r = f(d) \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \text{cos}(\alpha + \beta) + c_{\text{imy}} \quad (17)$$

Outro correção necessária é quando a câmera não esta perfeitamente na horizontal, esse problema que pode ser geralmente corrigido alterando os valores de c_{imx} e c_{imy} . A Fig. 4 apresenta os resultados obtidos na localização do sol nas imagens, os círculos indicam a posição calculada do sol.

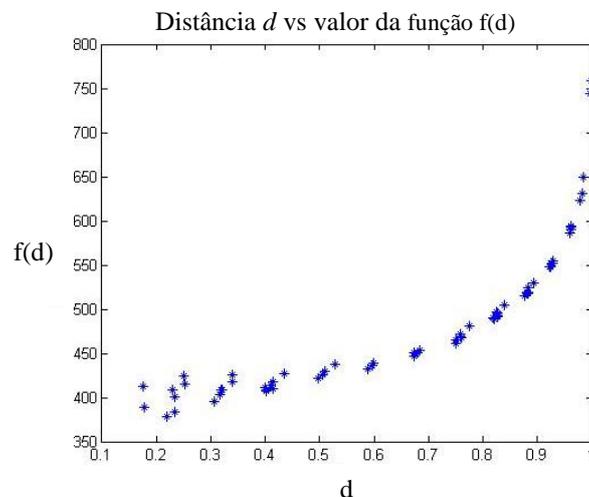


Figura 3 - Relação entre a função $f(d)$ e o valor d .



Figura 4 - Imagens do céu nas quais os círculos indicam a posição calculada do sol. Céu de Folsom-CA em horários diferentes. (fonte: *Coimbra Energy Group*)

2.3 Projeção da imagem para coordenadas retangulares

Como a previsão do sentido em que as nuvens se movimentam é feito pelo método de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*), é necessário planificar a imagem para que se tenha uma melhor definição do campo de velocidade. Para esse processo foi feito uma pequena alteração nas equações e programa desenvolvido por Marquez e Coimbra (2012).

A transformação proposta por eles segue da seguinte forma, o local dos pixels da imagem são primeiramente representados em coordenadas polares conforme a Eq. (18), em que r_1 é a distância do centro da imagem até a coordenada $[x_1, y_1]$ de qualquer local na imagem.

$$x_1 = r_1 \cdot \cos(\alpha), \quad y_1 = r_1 \cdot \sin(\alpha) \quad (18)$$

A imagem projetada também é similarmente representada, onde r_s é a distância radial para as coordenadas retangulares, Eq. (19). Com isso o mapeamento é determinado pela relação entre r_s e r_1 que é obtido através do ângulo zenital, Eq. (20).

$$x_s = r_s \cdot \cos(\alpha), \quad y_s = r_s \cdot \sin(\alpha) \quad (19)$$

$$\theta = \tan^{-1}(r_s) \quad (20)$$

Por fim a relação entre r_s e r_1 é obtida por uma interpolação. Diferente do que feito por Marquez e Coimbra (2012), observou-se que a Eq. (21), se adaptou melhor aos resultados não necessitando de uma interpolação cubica polinomial.

$$r_1 = \text{sen}(\theta \cdot 0,5) \quad (21)$$

2.4 Identificação de nuvens

O passo mais importante do método de previsão de irradiação solar por câmeras é determinar onde estão localizadas as nuvens. Este passo também é o mais complexo, devido a grande quantidade de variáveis que alteram a imagem. O maior problema encontrado na utilização da câmera de segurança FE8171V é quando o sol não está encoberto pelas nuvens, ocorrendo vários pontos de reflexo na imagem, esses pontos são muito claros e acabam sendo classificados como nuvens prejudicando as previsões.

A identificação das nuvens pode ser feito utilizando os canais vermelho e o canal azul de acordo (LONG, 2006) uma região sem nuvens é caracterizado por uma alta intensidade de pixels azuis “b” e baixa intensidade de pixels vermelhos “r”, enquanto os pixels das nuvens se caracterizam por ter alta intensidade dos dois canais. Marquez e Coimbra (2012), utilizaram o método desenvolvido por Li (2011), que utiliza uma razão normalizada, Eq. (22), e um limite que varia e classifica o pixel em nuvem ou céu.

$$\lambda_n = \frac{b - r}{b + r} \quad (22)$$

A maior diferença entre a câmera de segurança da Vivotek e o TSI, está no sistema de espelho rotativo com uma faixa de sombra que o TSI possui. Essa faixa de sombra reduz a irradiação direta recebida pela câmera e reduzindo assim o brilho excessivo em torno do sol. Além disso, a câmera de segurança possui uma resolução maior que o “Total

Sky Imager”. Devido a esses fatores, os programas desenvolvidos por Marquez e Coimbra (2012) não funcionaram bem classificando as nuvens e por isso outros programas tiveram que ser desenvolvidos.

Foi desenvolvido um novo programa para identificação das nuvens, tomando como base a Eq. (22). Para cada imagem é calculado o valor de λ_n para todos os pixels, resultando em uma matriz com valores variando de 0 a 1 (Fig. 5.c). Estipulando um valor limite λ_{nuv} é possível classificar os pixels como nuvem para todo $\lambda_n > \lambda_{nuv}$, porém quanto mais próximo ao sol mais esbranquiçado fica a imagem o que acaba classificando toda essa região como nuvem. Para contornar esse problema criou-se um círculo em degrade centrado no sol, Eq. (23), para reduzir o brilho próximo ao sol, o círculo pode ser visto na Fig. 5.d.

$$I(i, j) = \frac{\sqrt{(i - x_s)^2 + (j - y_s)^2}}{1536 \cdot 2} \quad (23)$$

Outra etapa do processamento da imagem desenvolvido foi uma máscara que exclui os prédios e árvores da imagem. Isso é feito removendo os pixels que possui $b < 80$, $r < 80$ e $g < 80$ ou pixels que $g > 120$, $r > 120$ e $b < 50$ ou pixels que $(g+b)/2 > b$ onde “g” é a intensidade do canal verde. A máscara pode ser visto na Fig. 5.e.

Por fim é calculado λ_{clas} , Eq. (24), e são definidos como nuvem todos os pixels que possuem valor $\lambda_{clas} > 0.485$, a Fig. 5.f expõem a matriz lógica com a seleção das nuvens (preto) e céu (branco).

$$\lambda_{clas} = \lambda_n \cdot \frac{I(i, j)}{5} + 0,4 \quad (24)$$

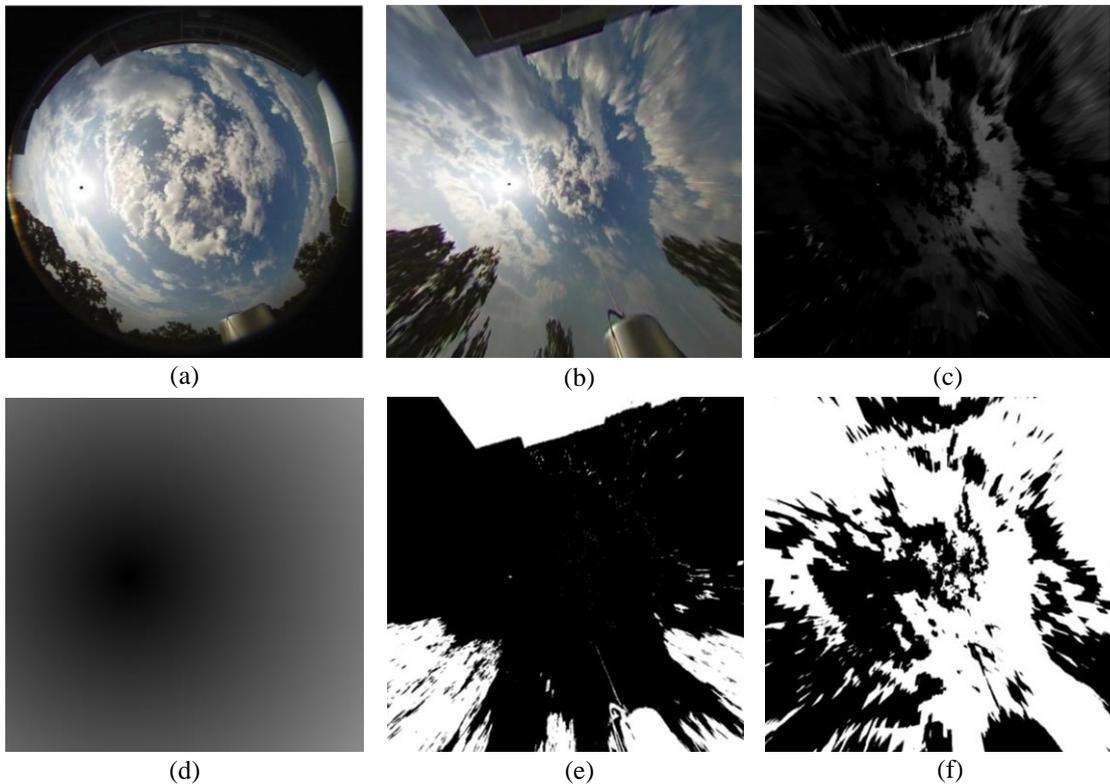


Figura 5 - (a) imagem original (fonte: *Coimbra Energy Group*), (b) imagem projetada, (c) resultado da razão λ_n , (d) círculo com gradiente para uniformizar λ_n , (e) máscara dos prédios e árvores e (f) resultado final da identificação das nuvens (preto) e céu (branco).

2.5 Velocidade e direção das nuvens

Para o cálculo do campo de velocidade das nuvens, foram utilizados os mesmos programas e configurações descritas por Marquez e Coimbra (2012). Foi também utilizado o software “MPIV” de velocimetria por imagem de partículas desenvolvido por Mori e Chang (2003).

O programa recebe duas imagens com espaçamento de 1 minuto entre elas, essas imagens são divididas em várias janelas de interrogação que são comparadas entre as imagens obtendo um vetor na direção que os pixels se locomoveram. As configurações foram: janela de interrogação definida com 32x32 pixels, sobreposição entre as janelas de 50% e deslocamento máximo de 20 pixels. A partir do campo de velocidade foi calculado o vetor representativo utilizando o método k-means, ele procura um vetor que melhor se aproxima de todos os outros vetores.

A única modificação realizada para adaptação do TSI para a câmera Vivotek, foi a redução da imagem para 15% do tamanho original antes de rodar o programa MPIV, isso acelerou o processamento em mais de 3 vezes e manteve a mesma qualidade dos resultados. Foi realizado alguns testes com o aumento do tamanho das janelas de interrogação, mantendo a escala original da imagem, resultando em processamento mais rápido, porém ocorreu uma redução da qualidade dos resultados.

Com o vetor representativo do campo de velocidade das nuvens, Marquez e Coimbra (2012), criam uma série de elementos quadriculados arranjados em forma de coluna, originando-se no sol e seguindo em direção oposta ao fluxo das nuvens, como visto na Fig. 6. Cada setor possui um tamanho de 85 x 85 pixels e dentro de cada um é somado todos os pixels classificados como nuvens (calculado na parte de identificação de nuvens). Depois esse valor é dividido pelo número total de pixels dentro de cada setor, menos a quantidade de pixels classificados como prédios ou árvores, obtendo-se a fração de nuvem em cada setor denominado de X_t .

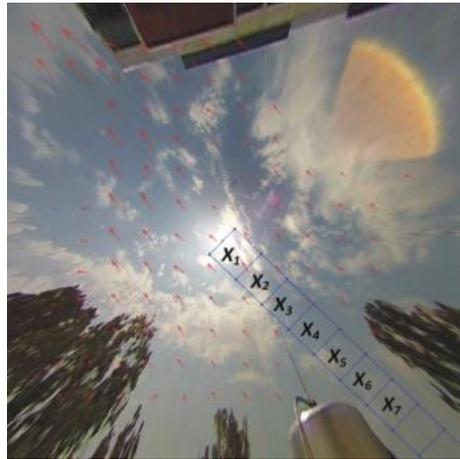


Figura 6 - Campo de velocidade e elementos quadriculados utilizados para determinar a fração de nuvem chegando ao sol. (fonte: Coimbra Energy Group)

2.6 Previsão de irradiação

A forma como os elementos estão orientados, permite que se possam fazer previsões para diferentes horizontes de tempo. Isso é feito com os dados de fração de nuvens, X_c , cada setor “c” é multiplicado pela irradiância calculada para céu limpo, I_t^{clr} , como visto na Eq. (25).

$$\hat{I}_t = I_t^{clr} \cdot X_c \quad (25)$$

Os resultados são comparados com os dados reais coletados em solo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Decidiu-se fazer previsão para a irradiação direta normal (DNI), já que Marquez e Coimbra (2012), também realizaram a previsão para DNI. Para obtenção dos valores teórico da irradiação direta normal, $I_{clr} = DNI_{clr}$, foi utilizado um programa desenvolvido pelo grupo de pesquisa Coimbra Energy Group, que utiliza o modelo baseado nas publicações de Ineichen (2002, 2006 e 2008).

Para testar o programa, foram selecionados vários dias aleatórios contendo dias ensolarados, parcialmente cobertos e dias completamente nublados. Para previsão nos horizontes de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos. Foram utilizadas duas imagens a cada 5 minutos com um intervalo de 1 minuto entre elas

As adaptações nos programas funcionaram como esperado, o programa localiza corretamente a posição do sol, as imagens são planejadas, porém o programa desenvolvido de classificação das nuvens não correspondeu as expectativas. A classificação ocorre corretamente somente com condições de nuvens bem específicas. Ele não classificou corretamente as nuvens quando o céu estava limpo, ou quando as nuvens eram muito finas. Esse problema já era esperado devido à falta de uma banda de sombra na câmera de segurança, causando uma área muito clara em volta do sol dificultando e prejudicando a classificação correta das nuvens. Outro problema é a passagem de nuvens finas, elas muitas vezes foram classificadas corretamente como nuvens, porém, como é uma classificação binária, o programa considera que há um bloqueio total da irradiação direta normal.

Alguns estudos foram realizados para tentar contornar essa dificuldade, como por exemplo, o de Huo e Lu (2009) e Li, Lu, e Yang (2011). Nesses trabalhos os autores, para classificar as nuvens, utilizaram um valor variável que dependiam de uma transformada rápida de Fourier (Huo e Lu 2009) e histograma das imagens (Li, Lu, e Yang, 2011). Ambos os trabalhos obtiveram resultados positivos e negativos dependendo da formação das nuvens e posição do sol, muito similar ao ocorrido neste trabalho.

Foi feito então uma restrição nos dias analisados, selecionando apenas horários e dias com uma grande quantidade de nuvens, esses resultados mostraram serem promissores obtendo valores $s > 0$, Tab. 1, Tab. 2 e Tab. 3.

Tabela 1 - Resultados da previsão de DNI para o dia 14/11/2013 das 16:00 as 20:00 UTC para cada 5 minutos.

Horizonte de previsão	RMSE [W/m ²]							Melhor <i>s</i>
	Persistente	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
5 min	193	317	283	260	336	480	562	-0,34
10 min	232	329	280	201	283	458	543	0,13
15 min	298	335	299	224	249	412	514	0,24
20 min	323	349	318	270	319	445	518	0,16
25 min	334	355	328	280	321	427	512	0,16
30 min	341	350	339	314	370	443	512	0,07

Tabela 2 - Resultados da previsão de DNI para o dia 07/01/2013 das 16:00 as 20:00 UTC para cada 5 minutos.

Horizonte de previsão	RMSE [W/m ²]							Melhor <i>s</i>
	Persistente	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
5 min	71	57	64	159	536	750	653	0,18
10 min	67	56	62	158	536	746	647	0,16
15 min	69	57	62	160	540	746	648	0,17
20 min	74	56	63	159	538	748	656	0,24
25 min	75	51	56	158	531	737	644	0,31
30 min	74	55	64	156	533	737	649	0,26

Tabela 3 - Resultados da previsão de DNI para o dia 10/01/2013 das 16:00 as 20:00 UTC para cada 5 minutos.

Horizonte de previsão	RMSE [W/m ²]							Melhor <i>s</i>
	Persistente	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
5 min	299	675	251	205	217	214	204	0,31
10 min	233	676	210	175	201	216	225	0,21
15 min	294	671	247	229	194	207	196	0,36
20 min	281	681	232	177	212	216	221	0,36
25 min	297	671	225	235	185	209	189	0,37
30 min	273	682	245	218	210	216	220	0,21

Dos resultados acima, foi selecionado o período que o método melhor se adaptou, dia 10 de janeiro de 2013 das 20:00 as 21:00 UTC, para fazer a previsão novamente agora utilizando o menor intervalo de tempo possível, o de 1 minuto. Os resultados apresentados na Tab. 4 mostram ser aceitáveis, com habilidade de previsão $s=0,37$. Analisando as imagens durante o processamento dos resultados (ex. Fig. 7), percebe-se que o método funcionou muito bem para esse período por algumas razões:

- Bom contraste entre o céu limpo e as nuvens.
- Nuvens densas encobrindo o sol por completo.
- As nuvens aproximaram do sol pela região mais aberta da imagem (sem prédios ou árvores por perto).

Tabela 4 - Resultados da previsão de DNI para o dia 10/01/2013 das 20:00 as 21:00 UTC para cada minuto.

Horizonte de previsão	RMSE							Melhor <i>s</i>
	Persistente	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
1 min	310	358	375	386	374	382	390	-0,15
2 min	417	357	383	384	373	381	380	0,14
3 min	454	373	383	386	381	383	384	0,17
4 min	457	374	346	365	378	368	365	0,24
5 min	458	365	320	366	383	370	361	0,30
6 min	462	335	311	369	382	372	382	0,32
10 min	426	332	276	311	349	348	378	0,35
15 min	496	338	346	348	328	343	348	0,37
20 min	442	338	337	330	349	358	372	0,30
25 min	493	308	309	364	322	330	307	0,37

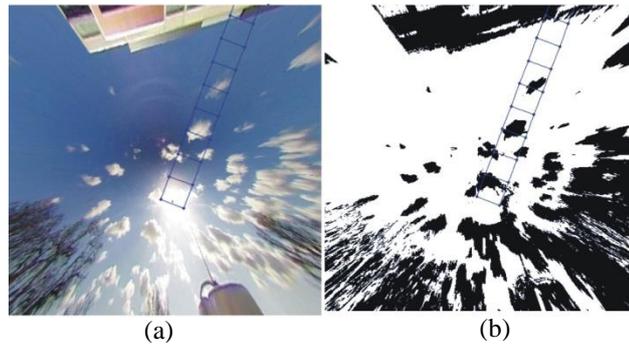


Figura 7 - (a) imagem do dia 10/01/2013 (fonte: *Coimbra Energy Group*).
 (b) identificação das nuvens, regiões pretas representam as nuvens.

Um melhor entendimento dos resultados observando na Fig. 8. É realizada uma correta previsão de algumas das quedas de irradiação direta normal, enquanto o método persistente não. Além disso foi possível prever situações onde o sol não estava encoberto. A diferença entre o que foi previsto e os valores reais medidos podem ser vistos na Fig. 9.

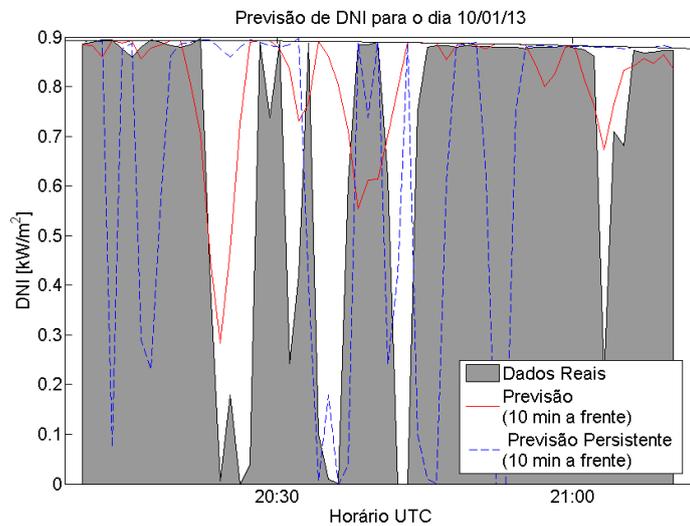


Figura 8 - Resultados da previsão de irradiação direta normal ($\hat{I}_t = \text{DNI}_t$) para horizonte de previsão de 10 minutos 10/01/13.

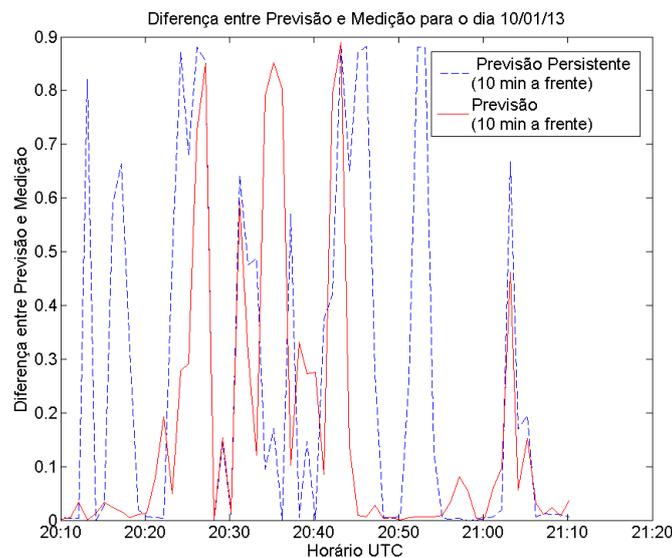


Figura 9 - Diferença entre previsão e a medição para o dia 10/01/13, horizonte de previsão de 10 minutos. A previsão realizada resulta em um erro muito menor do que a previsão persistente.

Marquez e Coimbra (2012) obtiveram valores de habilidade de previsão “s” entre 0,18 (para horizontes de 1 minuto) e 0,3 (para horizontes maiores que 10 minutos) com um pico de 0,37 para horizonte de 5 minutos. Comparando esses resultados com os da Tab. 4, percebe-se que a adaptação desenvolvida para a câmera de segurança Vivotek possui resultados da habilidade de previsão próximos. A diferença entre os dois resultados é que Marquez e Coimbra (2012) obtiveram uma melhor habilidade de previsão quando fazendo previsão para 5 minutos à frente, enquanto os melhores resultados desse projeto foram para previsão a 15 minutos a frente. Um motivo por isso ter ocorrido é porque para horizontes de tempo pequenos os setores X_1 e X_2 apresentam melhores resultados. Como o brilho do sol é mais intenso próximo a esses dois setores ocorrem muitos erros na identificação das nuvens, causando uma pior habilidade de previsão.

4. CONCLUSÃO

Foi realizada a adaptação do método desenvolvido por Marquez e Coimbra (2012), para a utilização da câmera de segurança Vivotek FE8171V devido o seu baixo custo. As adaptações nos programas funcionaram como esperado, porém ocorreram problemas para identificar nuvens em condições de intenso brilho do sol. Esse problema ocorre devido à falta de uma banda de sombra na câmera de segurança, causando uma área muito clara em torno do sol, dificultando e prejudicando a classificação correta das nuvens. Os resultados preliminares apresentados neste trabalho se mostram promissores, obtendo habilidade de previsão de até 37% para previsões de 15 minutos à frente.

Agradecimentos

Esse trabalho foi financiado pelo CNPq sob projeto intitulado “Simulação e Otimização Operacional de Unidade de Geração de Vapor Híbrida Bagaço de Cana-Heliotérmica em Instalação de Cogeração de Usina Produtora de Etanol”, (Processo 407076/2013-1).

Agradecemos ao professor Carlos F. M. Coimbra e sua equipe do *Coimbra Energy Group*, pelo suporte e auxílio no desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- Huo, J. e Lu, D., 2009. Cloud determination of all-sky images under low-visibility conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.
- Ineichen, P. e Perez R., 2002. A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. *Solar Energy*.
- Ineichen, P., 2006. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy*.
- Ineichen, P., 2008. Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content. *Solar Energy*.
- Inman, R. H., Pedro, H. T. e Coimbra, C. F., 2013. Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*.
- Lew, D., Piwko, R., 2010. Western wind and solar integration study. NREL National Renewable Energy Laboratory. Disponível em: < <http://www.nrel.gov/> >. Acesso em: 24/11/2013.
- Li, Q., Lu, W., Yang, J., 2011. A hybrid thresholding algorithm for cloud detection on ground-based color images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.
- Marquez, R. e Coimbra, C. F., 2012. Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis. *Solar Energy*.
- Marquez, R e Coimbra, C. F., 2013. Proposed Metric for Evaluation of Solar Forecasting Models. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- Mori, N., Chang, K. A., 2003. Introduction to MPIV Disponível em: < <http://www.nrel.gov/ncpv/> >. Acesso em: 20/11/2013.

SOLAR FORECASTING METHOD USING SECURITY CAMERA IMAGES

Abstract. *The increasing global demand for electricity encourages the use of solar energy. However, the current technology only allows 20% of the electric grid to be powered with this type of energy. In this work an adaptation of the direct normal irradiance forecast based on cloud tracking method was developed. To capture images of the sky it was used the security camera Vivotek FE8171V instead of the TSI-440 equipment, reducing the cost by 25 times. Adjustments were made in the programs that locate the Sun, transform the image in to rectangular coordinates and identify the clouds. The results achieved were satisfactory with a forecasting skill above 20%, however the program that identifies the clouds still requires modifications.*

Key words: *Solar Energy, Solar forecasting, Security Camera, Cloud tracking*