

Procedimento de calibração dos dados SST

The SST team

1 Descrição dos dados do SST

O SST é um rádio-telescópio que registra (*observa*) ondas electromagnéticas em duas frequências: 212 GHz e 405 GHz que correspondem aos comprimentos de onda de 1,4 mm e 0,7 mm respectivamente. Sua função principal é o monitoramento da atividade solar de forma contínua. Os dados do SST representam a potência da onda (*intensidade*) incidente em função do *tempo*. A cada intervalo temporal (*time bin*) de 5 ms seis sensores (também chamados de *receptores*, *radiômetros* ou *canais*) registram a intensidade média do período em unidades linearmente proporcionais à potência que chamamos de ADCUs: Analog to Digital Units. Dos seis radiômetros, quatro operam na frequência de 212 GHz e os outros dois a 405 GHz. Os time bins são registrados em centenas de microsegundos (100 μ s \equiv 0,1ms) a partir das 0 UT.

A direção de apontamento do telescópio é também armazenada junto com as intensidades e o time bin. A direção é definida por meio de duas coordenadas angulares: Azimute (Az) e Elevação (El) e registradas em unidades de miligraus. Estes valores são fornecidos pelo sistema de apontamento cuja taxa de comando e amostragem é de 50 ms.

Outros parâmetros da observação são o *modo de operação* do telescópio que é codificado por meio de um número < 255. Alguns valores são

| Modo | Descrição |
|-------------|---|
| 0 | : <i>tracking</i> |
| 1 | : Mapa em AR–Declinação |
| 2 | : Mapa em Azimute–Elevação |
| 3 | : Mapa Radial |
| 4 | : Intermeio entre varreduras de um mapa |
| 5 | : varredura em azimute |
| 10 | : scan de céu |
| 99 | : indefinido |

O alvo (*target*) do telescópio também é codificado e armazenado. Trata-se de um número < 32:

| Alvo | Descrição |
|-------------|-------------------------|
| 0 | : Céu |
| 2 | : Vênus |
| 4 | : Marte |
| 5 | : Júpiter |
| 10 | : Lua |
| 11 | : Sol (centro do disco) |
| 12 | : Região Ativa |
| 13 | : Estrela |
| 20 | : Beacon |
| 31 | : indefinido |

Os cinco *bits* do alvo fazem parte de um inteiro positivo de 8 *bits* em sua posição menos significativa. Os restantes três bits representam a posição do espelho de calibração (vide Seção 2) segundo o seguinte quadro:

| Decimal | Binário | : Descrição |
|----------------|----------------|-----------------------------------|
| 0 | 000 | : antena |
| 1 | 001 | : Fonte calibradora <i>fria</i> |
| 2 | 010 | : Fonte calibradora <i>quente</i> |
| 7 | 111 | : indefinido |

Então, dado um valor **target** do alvo: a divisão inteira de **target** /32 recupera a posição do espelho, enquanto que o resto da divisão inteira (**target MOD 32**) recupera o código do objeto observado.

Com estes dados e outros mais, que serão descritos posteriormente, são criados três tipos básicos de arquivos binários. Os arquivos estão formados por registros de comprimento fixo:

1. **fast**: um registro para cada time bin de 5 ms. Acumulam um máximo de 10 minutos de observação.
2. **intg**: um registro para cada time bin de 40 ms. Guardam as médias temporais (*integração*) dos valores registrados nos arquivos **fast**. Duração máxima de 1 hora.
3. **instr**: um registro a cada 1000 ms = 1 s. Representam a média temporal dos valores registrados nos arquivos **fast** a cada 1 s. Adicionam outras informações relativas ao processo de calibração. Duração máxima de 1 dia.

Segue uma descrição mais detalhada dos arquivos.

1.1 Arquivos Fast (**fast**)

O nome do arquivo codifica a data e o horário de criação, que se correspondem com os da observação. Tipicamente é criado um arquivo **fast** a cada 10 minutos. O nome completo é: **rfYYYYMMDD.hhmm**, onde **YYY** representa o ano substraido o valor 1900: por exemplo **YYY** é igual a 113 para arquivos criados em 2013. **MM** é o mês de 1 até 12, **DD** é o dia de 1 até 31; **hh** são as horas de 0 até 23 e **mm** são os minutos de 0 até 59. Cada registro possui os campos gravados exatamente na ordem da Tabela 1 resultando em um comprimento de 64 bytes. Desta forma cada arquivo de 10 minutos tem um tamanho de 7.680.000 bytes. Durante uma hora de observações são gerados 46.080.000 bytes de arquivos **fast** e em dia típico, de 10 horas de observação, um total de 460.800.000 bytes ou 439,45 MB. Em razão do volume, no banco de dados do **SST** os arquivos **fast** estão compactados em formato **gzip**.

1.2 Arquivos Integrados (**intg**)

O nome codifica a data e o horário de criação do arquivo e segue as mesmas regras dos arquivos **fast**: **rsYYYYMMDD.hh00**, as únicas diferenças são o prefixo literal **rs** e o duplo 00 no fim, indicando que representa uma hora cheia. Cada arquivo **int** armazena um máximo de uma hora de dados de observação e registra a média dos valores **fast** em time

| Nome | Tipo | Descrição |
|------------|-------------|---|
| | Numérico | |
| TIME | int | tempo em $100\mu\text{s}$ a partir das 0 UT |
| 6_ADCVAL | unsig short | intensidade registrada por cada sensor em ADCUs |
| POS_TIME | int | |
| AZIPOS | int | azimute do posicionador do telescópio em miligraus |
| ELEPOS | int | elevação do posicionador do telescópio em miligraus |
| PM_DAZ | short | |
| PM_DEL | short | |
| AZIERR | int | |
| ELEERR | int | |
| X_OFF | short | |
| Y_OFF | short | |
| 6_OFF | short | |
| TARGET | char | alvo observado + posição de espelho de calibração |
| OPMODE | char | modo de observação do telescópio |
| GPS_STATUS | short | |
| RENUM | int | |

Tabela 1: Descrição da estrutura de dados dos arquivos `fast` e `int`. Onde int=4 bytes, unsigned short=2 bytes, short=2 bytes e char=1 byte.

bins de 40 ms. A estrutura de cada registro é a mesma que a dos arquivos `fast`. Como a duração máxima é de 1 hora, o tamanho máximo é de 5.760.000 bytes, e num dia de observação de 10 horas, são gerados 57.600.000 bytes ou 54,93 MB.

1.3 Arquivos Instrumentais (`instr`)

O nome segue regras semelhantes aos anteriores: `biYYYYMMDD`: com o literal `bi` na frente e sem identificação das horas e minutos no fim. Cada arquivo `instr` armazena um máximo de um dia de dados de observação e registra a média dos valores `fast` em time bins de 1 s. A estrutura dos dados é descrita na Tabela 2. Cada registro tem um comprimento de 123 bytes, num dia típico (10 horas de observação) são 36.000 registros resultando em um arquivo de 4.428.000 bytes ou 4,22 MB.

2 Conversão das intensidades em temperaturas

O primeiro passo para tratar os dados do SST é converter os ADCUs em unidades físicas. Em radiometria é correto trabalhar em temperatura, como se a antena fosse um grande termômetro. A conversão de ADCUs para graus kelvin é linear

$$T_{\text{antena}} = \text{ADCU} \times g + off , \quad (1)$$

onde `ADCU` representa o valor da intensidade tal como ficou armazenado no arquivo binário, `g` é um fator de proporcionalidade entre `ADCU` e temperatura e `off` é um offset relacionado com a *temperatura do sistema*. O resultado, T_{antena} , é chamado de *temperatura de antena* e tem unidades de graus kelvin (K). Cada receptor tem coeficientes `g` e `off` próprios que,

| Nome | Tipo | Descrição |
|---------------|-------------|--|
| | Numérico | |
| TIME | int | tempo em $100\mu\text{s}$ a partir das 0 UT |
| AZIPOS | float | azimute do posicionador do telescópio em graus |
| ELEPOS | float | elevação do posicionador do telescópio em graus |
| AZIERR | float | erro do azimute do posicionador do telescópio em graus |
| ELEERR | float | erro da elevação do posicionador do telescópio em graus |
| 6_ADC | unsig short | intensidade registrada por cada sensor em ADCUs |
| 6_SIGMA | float | desvio padrão da intensidade no intervalo de 1 s em ADCUs |
| GPS_STATUS | short | |
| ACQ_GAIN | short | |
| TARGET | char | alvo observado + posição de espelho de calibração |
| OPMODE | char | modo de observação do telescópio |
| 6_OFF | short | |
| HOT_TEMP | float | temperatura da fonte quente de calibração em graus celsius |
| AMB_TEMP | float | temperatura da fonte fria de calibração em graus celsius |
| OPT_TEMP | float | temperatura da caixa dos radiométricos em graus celsius |
| IF_BOARD_TEMP | float | temperatura da caixa dos amplificadores IF em graus celsius |
| RADOME_TEMP | float | temperatura da caixa do ambiente da antena em graus celsius |
| HUMIDITY | float | umidade relativa do ar, estação meteorológica externa |
| TEMPERATURE | float | temperatura externa, estação meteorológica |
| OPAC_210 | float | |
| OPAC_405 | float | |
| ELEVATION | float | |
| PRESSURE | float | pressão atmosférica, estação meteorológica |
| BURST | char | |
| ERRORS | int | |

Tabela 2: Descrição da estrutura de dados instrumentais `instr`. Onde float=4 bytes, int=4 bytes, unsigned short=2 bytes, short=2 bytes e char=1 byte.



Figura 1: Foto do SST com a radoma aberta durante uma operação de manutenção. Pode-se ver a antena (*espelho principal*) e logo abaixo dela a *caixa dos radiômetros* ou receptores.

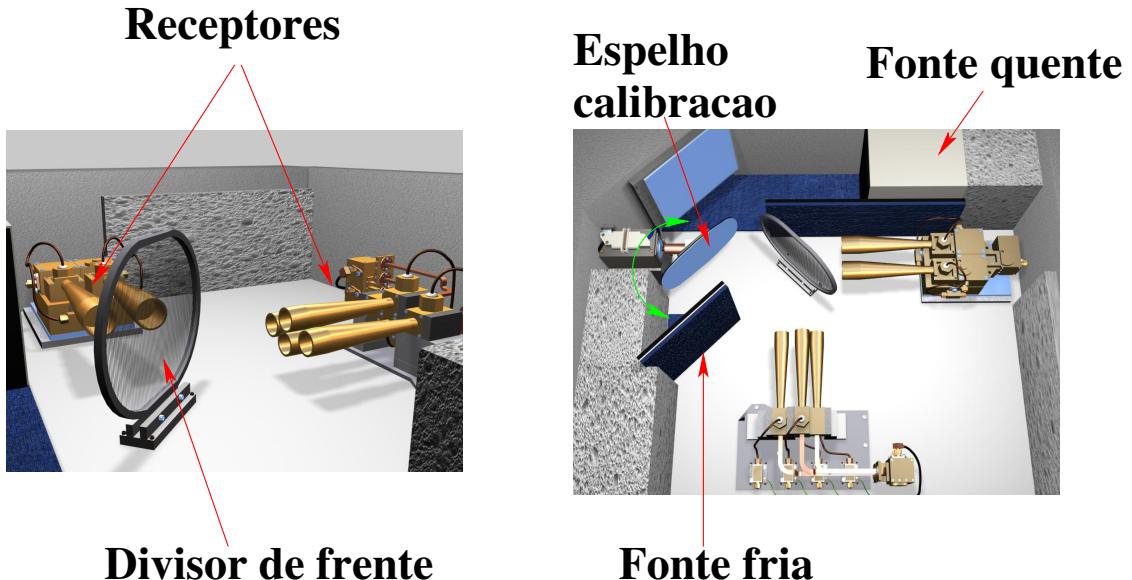


Figura 2: Esquemas da caixa dos radiômetros do SST. A esquerda podemos ver os seis receptores e a grade divisora de frente de onda (semi-espelho). A direita, uma vista de cima mostra os radiômetros, o espelho de calibração (que pode girar) a fonte quente e a fonte fria.

por outra parte, **mudam ao longo do tempo**. Por esse motivo os coeficientes são determinados várias vezes durante as observações diárias.

O procedimento para se obter os coeficientes consiste em observar fontes a temperatura estável e calibrada. Para isto dentro da *caixa dos radiômetros* (Figura 1) há um *espelho* que é girado de forma que os receptores fiquem observando na direção da fonte fria, ficando por 20 segundos. Logo em seguida o espelho é girado para a posição da fonte quente, registrando as intensidades por mais 20 segundos (Figura 2). Na Figura 3 temos o resultado do procedimento: ainda em ADCUs: a curva preta representa a intensidade registrada pelo receptor 1, as linhas em vermelho marcam a posição do espelho codificada segundo comentamos acima: 0 corresponde à posição **antena**, 1 à posição **fria**, 2 à **quente** e 7 representa a posição **indefinida** (o espelho está em movimento).

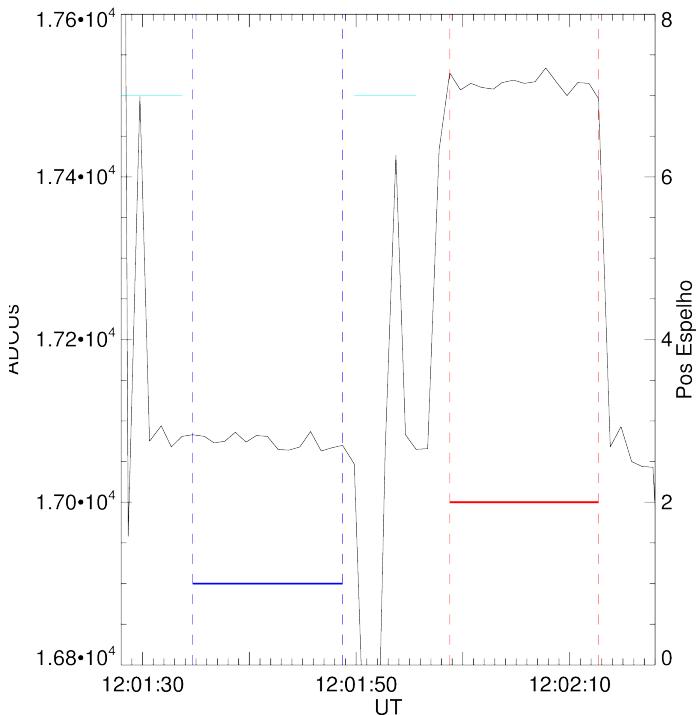


Figura 3: Intensidade em função do tempo registrada pelo canal 1 durante uma calibração. O eixo esquerdo das ordenadas mostra o valor da intensidade em ADCUs, o eixo direito mostra o valor da posição do espelho. A reta horizontal vermelha indica o intervalo durante o qual o espelho estava em posição **quente** (2) e a reta azul o intervalo para a posição **fria** (1). Em cor azul clara, as retas horizontais mostram os períodos em que o espelho esteve em posição indefinida.

Durante o mesmo intervalo de tempo, são registradas as temperaturas da fonte fria T_{fria} e quente T_{quente} e armazenadas no arquivo `instr`. Para achar os coeficientes g e off devemos resolver o sistema de equações (2) e (3).

$$T_{fria} = \text{ADC}_{fria} \times g + off \quad (2)$$

$$T_{quente} = \text{ADC}_{quente} \times g + off \quad (3)$$

onde as incógnitas são g e off , enquanto que ADCU_{fria} e ADCU_{quente} são as médias das intensidades e T_{fria} e T_{quente} as médias das temperaturas das fontes¹ durante os períodos

¹Lembrando que nos arquivos estão em graus celsius (°C) e precisam ser transformados para graus kelvin (K).

em que o espelho ficou na respectiva posição. No exemplo da figura 3 o sistema fica

$$\begin{aligned} 296.6 &= 17075g + off \\ 351.5 &= 17514g + off \end{aligned}$$

Resolvendo o sistema anterior obtemos $off = -1832$ K e $g = 0,1247$ K ADCU⁻¹. O procedimento para a obtenção dos coeficientes g e off é repetido várias vezes ao dia registrando variações. Uma interpolação para tempos intermediários é realizada para poder realizar a conversão em todo instante do dia. Uma vez obtidos os valores interpolados, a fórmula da equação (1) é aplicada às intensidades de cada radiômetro para cada time bin o que resulta em seis vetores de temperaturas $T_{antena,i}$ com i o índice que identifica o radiômetro².

3 Correção da emissão e absorção atmosférica

A radiação advinda do espaço exterior é modificada ao atravessar a atmosfera terrestre. Chamamos T_{ext} à intensidade incidente **antes de entrar na atmosfera terrestre**, que é a grandeza física que queremos conhecer. Este valor é alterado de duas formas diferentes. Em primeiro lugar, como a atmosfera é um gás a uma temperatura $T_{atm} \simeq 300$ K, emite como um *corpo negro*. Essa radiação é somada a T_{ext} , quer dizer que é um efeito **aditivo**. Em função do ângulo de elevação, o modelo mais simples de emissão atmosférica é

$$T_{ceu}(el) = T_{atm} \left(1 - e^{-\tau(\nu)/\sin(el)} \right), \quad (4)$$

onde $\tau(\nu)$ é a *opacidade ou profundidade ótica* em direção ao zénite e depende da frequência ν . No caso do SST, que opera em duas frequências diferentes, devemos determinar τ para cada uma delas. Na equação (4) el representa o ângulo de elevação da antena no momento da observação.

O segundo efeito atmosférico é **multiplicativo** e corresponde à absorção da radiação incidente

$$f(el) = e^{-\tau(\nu)/\sin(el)} < 1. \quad (5)$$

$f(el)$ é um fator menor que 1 que multiplica a T_{ext} . Finalmente, juntando ambos efeitos temos a *temperatura observada*, T_{obs} ³

$$T_{antena} = T_{obs}(el) = T_{ext} e^{-\tau/\sin(el)} + T_{atm} \left(1 - e^{-\tau/\sin(el)} \right). \quad (6)$$

Isolando T_{ext} na equação (6) obtemos

$$T_{ext} = \left[T_{antena} - T_{atm} \left(1 - e^{-\tau/\sin(el)} \right) \right] e^{\tau/\sin(el)}. \quad (7)$$

3.1 Opacidade

Precisamos determinar $\tau(\nu)$ para cada frequência. Existem várias técnicas. Uma delas utiliza a observação de uma *varredura* do céu (azimutalmente afastada da fonte observada,

²Na convenção de IDL os índices de arranjos vetoriais começam em 0.

³Em muitos textos à estes dois termos é adicionado ainda a *radiação de fundo cósmico* T_{RFC} . No entanto, como esta corresponde a um corpo a 2,75 K e normalmente nós observamos o Sol com temperatura superior a 5.000 K, para nossos trabalhos T_{RFC} é desconsiderada.

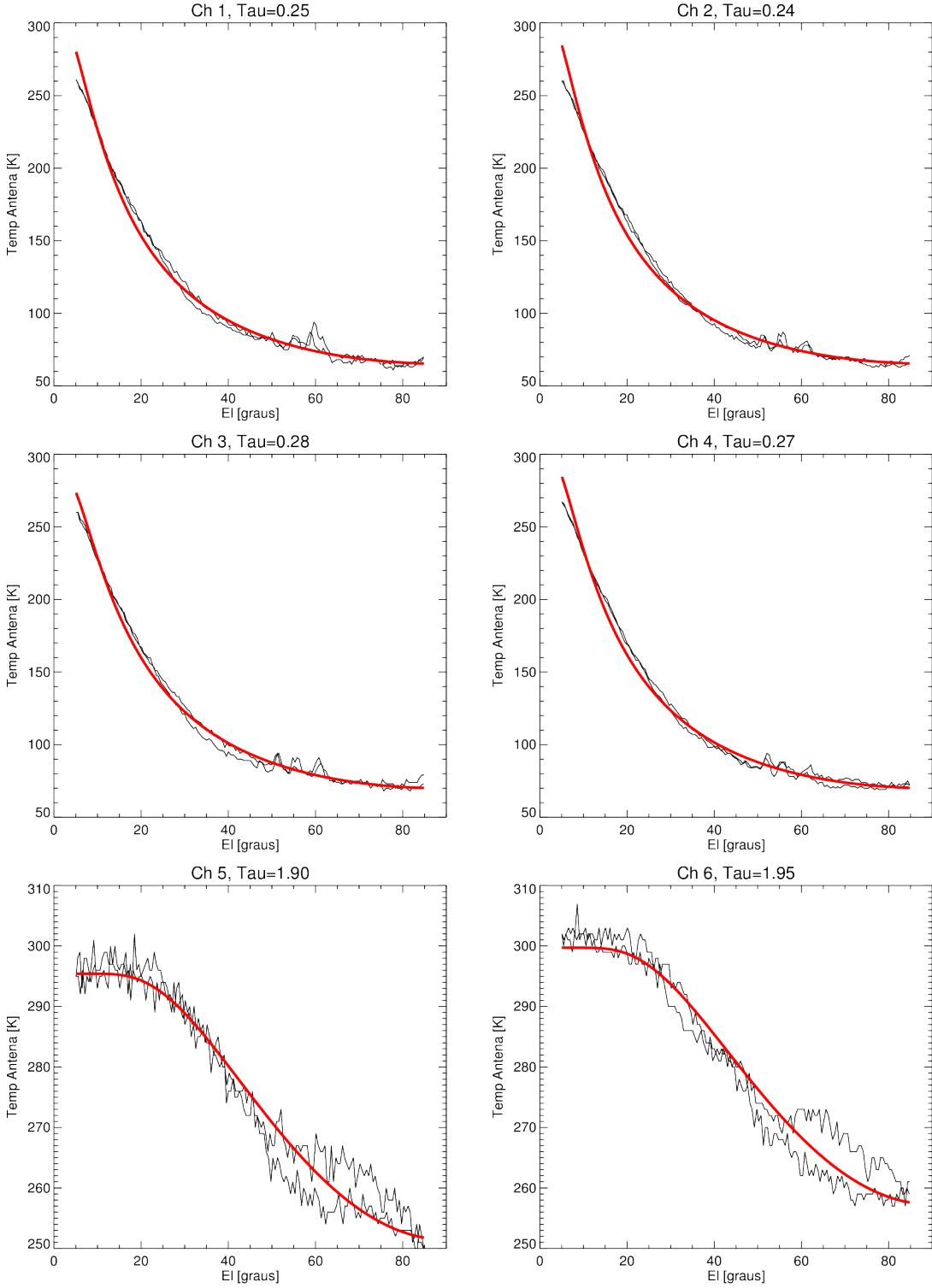


Figura 4: Ajuste de um tipping. O procedimento é realizado nos dados de cada canal. O valor final adotado é a média dos valores para cada frequência.

por exemplo o Sol) em direção vertical, desde quase o horizonte, até quase o zénite: *varredura em elevação*, também chamada de *tipping*. Convertendo as intensidades dos radiômetros em temperatura de antena e usando a equação (4) ajustamos uma curva por meio de um algoritmo matemático de gradiente, obtendo como resultado os parâmetros T_{atm} e $\tau(\nu)$. Na Figura 4 vemos um exemplo do ajuste de um tipping. O valor final

é a média para cada frequência: $\tau(212) = 0,26$ e $\tau(405) = 1,93$. Este procedimento é repetido várias vezes por dia, em alguns casos observá-se uma variação no valor de $\tau(\nu)$.

4 Sequência de Calibração

De forma esquemática, a sequência de passos para a conversão e correção dos dados de intensidade dos radiômetros do SST, processo que chamamos de *calibração*, é a seguinte:

1. Leitura do arquivo `instr` com dados correspondentes a um dia inteiro, e resolução de um segundo. As variáveis relevantes são:
 - (a) `TIME`
 - (b) `ADC` (arranjo de seis elementos para cada tempo)
 - (c) `ELEPOS`
 - (d) `OPMODE`
 - (e) `TARGET`
 - (f) `HOT_TEMP`
 - (g) `AMB_TEMP`
2. Obtenção dos coeficientes de conversão `ADCU` para temperatura.
 - (a) Determinação dos intervalos temporais em que há um procedimento fonte fria / fonte quente mediante a variável `TARGET`
 - (b) Para cada procedimento, resolução do sistema de equações (2,3) e obtenção dos pares (g_i, off_i) para cada canal i .
 - (c) Interpolação linear dos valores destes coeficientes para cada canal para cada time bin.
 - (d) Aplicação da fórmula da equação (1) a cada canal em cada time bin.
3. Conversão `ADCU` para temperatura. A cada canal será aplicada a fórmula da equação (1)
4. Correção atmosférica.
 - (a) Determinação dos intervalos temporais em que há um *tipping*: a variável `OPMODE=10`
 - (b) Para cada intervalo, ajuste da função da equação (4). Obtenção de $\tau(212)$ e $\tau(405)$ junto com T_{atm} .
 - (c) Interpolação dos valores da opacidade para cada time bin.
 - (d) Aplicação da fórmula (7). Esta fórmula **não deve ser aplicada** aos intervalos durante os que há um *tipping* porque gera resultados inconsistentes.

4.1 Exemplo de Calibração

O procedimento descrito acima foi aplicado aos dados `instr` do dia 6 de março de 2012. Nas figuras 5 e 6 é mostrada a sequência de passos da calibração desde as intensidades em ADCUs (paineel superior), até a obtenção de T_{ext} (paineel inferior). O resultado final em 405 GHz (paineel inferior na figura 6) no início e no fim do dia mostra forte variação do sinal, produto da opacidade relativamente alta, $\tau(405) = 1,90$. No entanto no periodo central do dia T_{ext} apresenta um valor bastante constante com flutuações. O mesmo vale para o canal 1 em 212 GHz. Este resultado é esperado sempre que a posição do feixe relativa ao disco solar não varie.

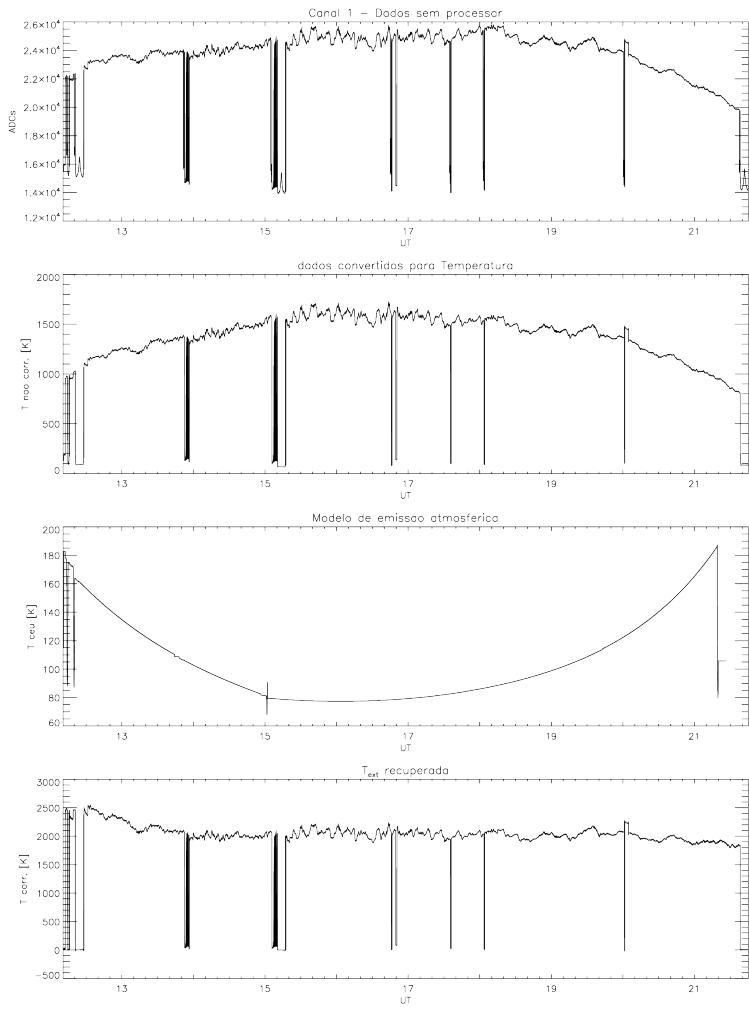


Figura 5: Processo de calibração dos dados do SST. De cima para abaixo: variação da intensidade ao longo do dia registrada no canal 1 em ADCUs; intensidade convertida a temperatura; modelo da emissão atmosférica e T_{ext} recuperada após aplicação do procedimento.

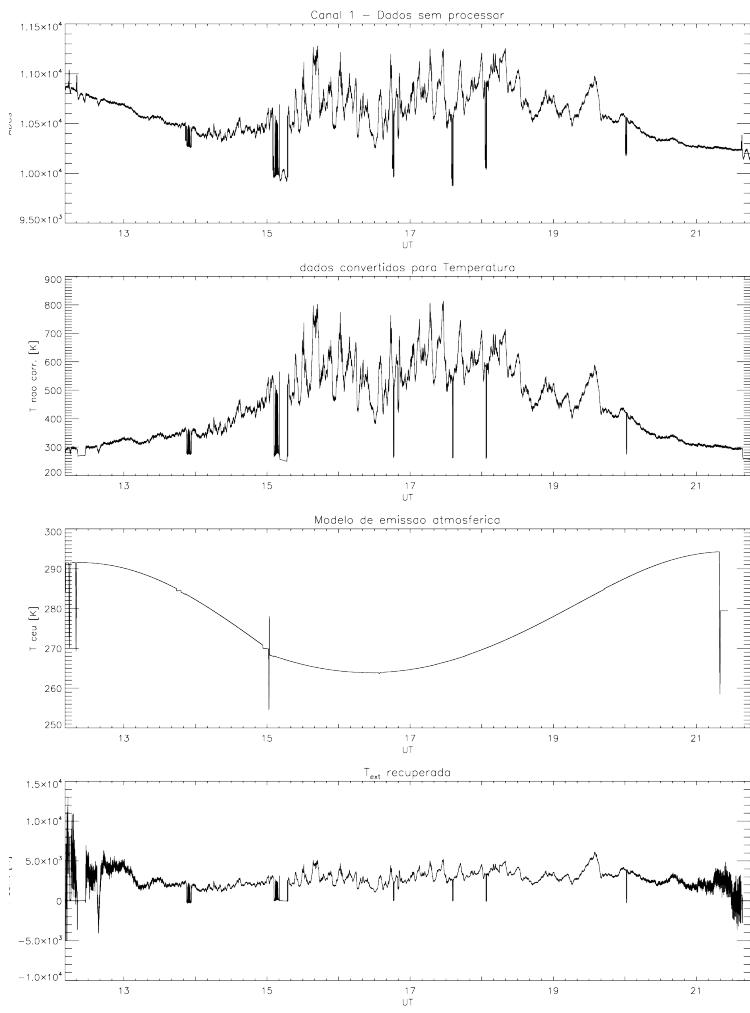


Figura 6: Processo de calibração dos dados do SST. De cima para abaixo: variação da intensidade ao longo do dia registrada no canal 5 em ADCUs; intensidade convertida a temperatura; modelo da emissão atmosférica e T_{ext} recuperada após aplicação do procedimento.