

CAPÍTULO 2

Princípios Fundamentais das Medições de Temperatura

2.1 Definição da Grandeza Temperatura

A grandeza física fundamental denominada temperatura termodinâmica (T) é provavelmente uma das grandezas mais empregadas para avaliar e quantificar fenômenos das mais diversas características ou naturezas. Por esta abrangência de possibilidades de utilização e servir de definição para outras grandezas é que ela foi escolhida para ser uma das sete grandezas de base do Sistema Internacional de Grandezas. Possui como unidade de medida o kelvin (K), que foi definido em 1960 como sendo a fração $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água (EIT - 90, 1990).

A escala de temperatura foi definida de forma permitir expressar um valor de temperatura em termos de sua diferença para o ponto fixo do gelo, que é de 273,15 K. Um exemplo de temperatura termodinâmica que pode ser expressa desta maneira é a chamada temperatura Celsius ($^{\circ}\text{C}$), definida por $t/^{\circ}\text{C} = T/(\text{K} - 273,15)$, sendo que a sua unidade denominada de grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$), que por definição, é igual em módulo ao kelvin.

2.2 Medições Práticas de Temperatura

A Escala Prática de Temperatura foi definida empiricamente a partir de pontos fixos, onde se estabelecem os estados de equilíbrio termodinâmico de substâncias quimicamente puras, de tal forma que as temperaturas associadas aos referidos pontos se mantenham estabilizadas e constantes ao longo do tempo. Esta nova escala vem ao longo dos anos sofrendo várias atualizações a fim de adequar suas características e premissas à Escala Termodinâmica de Temperatura. Seu estabelecimento oficializado na Conferência Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) com o intuito de facilitar as medições de temperatura internacionalmente

com menos complexidade e maior praticidade além dos menores custos operacionais (EIT - 90, 1990).

As referências internacionais das medições de temperatura se baseiam na Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT, 1990), permitindo que a partir dela se desenvolva uma cadeia de rastreabilidade com uma única origem, onde as demais medições relativas à grandeza deverão estar associadas.

2.3 Padronização Primária da Grandeza Temperatura

A padronização primária da grandeza temperatura se dá através dos chamados pontos fixos, que corresponde ao equilíbrio entre duas ou três fases físicas de uma substância hipoteticamente pura, de forma que haja um valor de temperatura precisamente estabelecido e considerado como o valor de referência por definição.

Verifica-se internacionalmente, que a quase totalidade dos pontos fixos é de elementos metálicos (exceções para o argônio e a água) com pureza superior a 99,999 %, estando os mesmos acondicionados em cadinhos de grafite de alta pureza que são protegidos por tubos de quartzo selados com um gás inerte, geralmente argônio. Todo este conjunto é denominado de célula selada de pontos fixos de temperatura e são fabricadas com o intuito de que na temperatura de transição entre as fases, sólida e líquida do metal a pressão interna na célula seja próxima da pressão atmosférica de 101325 Pa (SANTOS, 2008).

A estrutura de uma célula de ponto fixo, esquematicamente representada na Figura 2, possui um tubo em seu núcleo denominado de poço termométrico, onde as fases devem estar em equilíbrio térmico e que corresponde ao local onde o instrumento de medição de temperatura seja inserido para ser calibrado. O tubo é fechado na extremidade inferior de forma que não haja nenhum contato do termômetro com o material interno da célula. Usualmente, as células são empregadas em fornos posicionados verticalmente que, dependendo da faixa de trabalho, podem ser controlados por zonas (principal e auxiliar) ou por um encamisamento isotérmico conhecido como “*heat pipe*” a fim de homogeneizar melhor a temperatura e reduzir os gradientes térmicos na região de medição.

Por características intrínsecas devido à difusão de impurezas nos metais das

células de pontos fixos, elas apresentam maior repetitividade em processos de solidificação do que em processos de fusão, com algumas poucas exceções. (SANTOS, 2008).

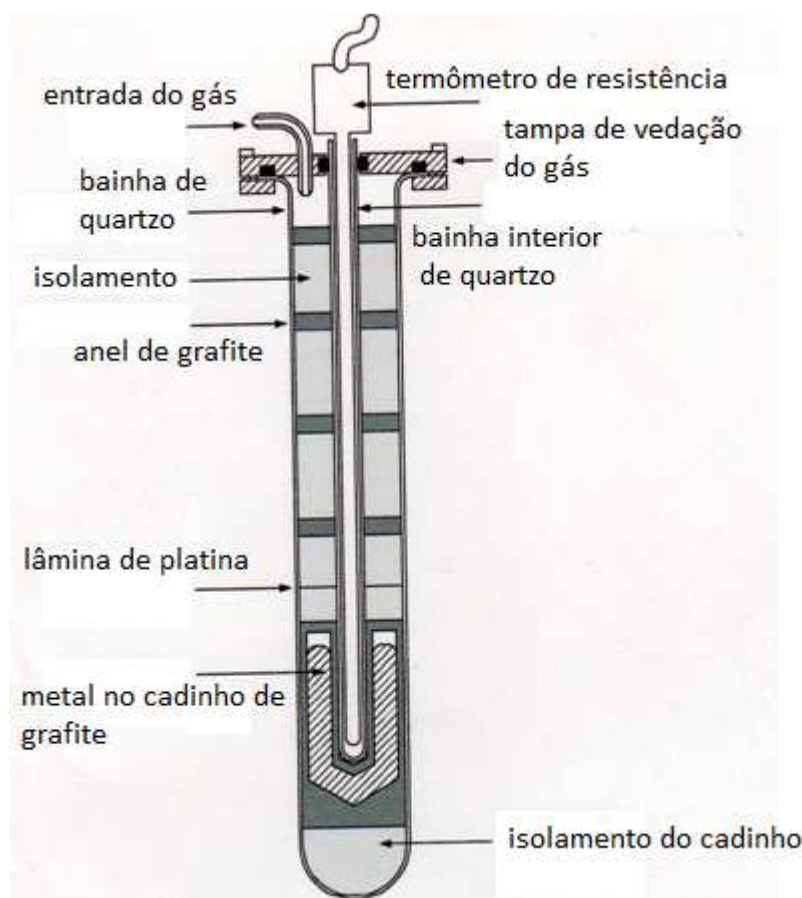


Figura 2: Visão de uma célula de ponto fixo em corte constando os elementos principais, adaptado de (NICHOLAS, 2001).

Pelo exposto anteriormente, uma das maneiras de se buscar a rastreabilidade nas medições de temperatura é através das medições realizadas a partir dos pontos fixos designados pela Escala Internacional de Temperatura EIT - 90, de acordo com a Tabela 1. Entretanto, a rastreabilidade também pode ser obtida de maneira menos sofisticada e custosa com as chamadas calibrações por comparações a padrão de referência. Deste modo, um usuário da grandeza poderá obter a sua rastreabilidade indiretamente à EIT - 90 com menor ônus e complexidade (SANTOS, 2008).

Tabela 1: Pontos fixos de definição que constam na Escala Internacional de Temperatura EIT - 90, adaptado de (SANTOS, 2008).

Ponto	Temperatura		Substância	Estado
	T_{90}/K	$T_{90}/^{\circ}C$		
1	3 a 5	- 270,15 a - 268,15	He	Ponto de pressão do vapor
2	13,8033	- 259,3467	e-H ₂	Ponto de pressão do vapor (ou de termômetro de gás)
3	≈ 17	$\approx - 256,15$	e-H ₂ (ou He)	Ponto de pressão do vapor (ou de termômetro de gás)
4	$\approx 20,3$	$\approx - 252,85$	e-H ₂ (ou He)	Ponto triplo
5	24,5561	- 248,5939	Ne	Ponto triplo
6	54,3584	- 218,7916	O ₂	Ponto triplo
7	83,8058	- 189,3442	Ar	Ponto triplo
8	234,3156	- 38,8344	Hg	Ponto triplo
9	273,16	0,01	H ₂ O	Ponto triplo
10	302,9146	29,7646	Ga	Ponto triplo
11	429,7485	156,5985	In	Ponto de solidificação
12	505,078	231,928	Sn	Ponto de solidificação
13	692,677	419,527	Zn	Ponto de solidificação
14	933,473	660,323	Al	Ponto de solidificação
15	1234,93	961,78	Ag	Ponto de solidificação
16	1337,33	1064,18	Au	Ponto de solidificação
17	1357,77	1084,62	Cu	Ponto de solidificação

2.4 Rastreabilidade das Medições de Temperatura em um País

Cada país que deseja almejar um desenvolvimento científico e industrial consistente deve estabelecer um sistema metrológico soberano e independente, de forma a assegurar o aprimoramento da exatidão nas medições realizadas em todo o seu território. Procura-se assim, antecipar demandas metrológicas a fim de atender as necessidades prementes de sua sociedade.

Desta forma, o ente público nacional que tem a missão de exercer este papel de representatividade metrológica em âmbito governamental são os chamados Institutos Nacionais de Metrologia (INMs). Estas instituições atendem a ampla faixa de atividades, com destaque especial para a disseminação das diversas unidades das grandezas através de calibrações rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI).

O conceito de rastreabilidade está relacionado com o resultado de uma medição e não com o instrumento submetido à medição propriamente dito. A rastreabilidade, sendo a base da metrologia, é estabelecida a partir da definição, realização e disseminação das unidades de medida.

A realização das unidades do Sistema Internacional de grandezas se dá pela aplicação de métodos experimentais e por uma cadeia contínua de comparações sucessivas, partindo de uma referência inicial denominada de padrão primário e esquematicamente representada na Figura 3 (site www.inmetro.gov.br).



Figura 3: Etapas para estabelecimento da rastreabilidade de uma medição a partir do BIPM, adaptado do site do Inmetro (www.inmetro.gov.br).

No caso da área de temperatura, o conceito de rastreabilidade é realizado tomando como referência a Escala Internacional de Temperatura EIT - 90, de acordo com a Figura 4, onde se deseja estabelecer que todos os instrumentos de medição que meçam temperatura estejam calibrados segundo esta referência. Ao se adotar a EIT - 90, o país economiza tempo e recursos, além de facilitar a disseminação da grandeza (SANTOS, 2008).

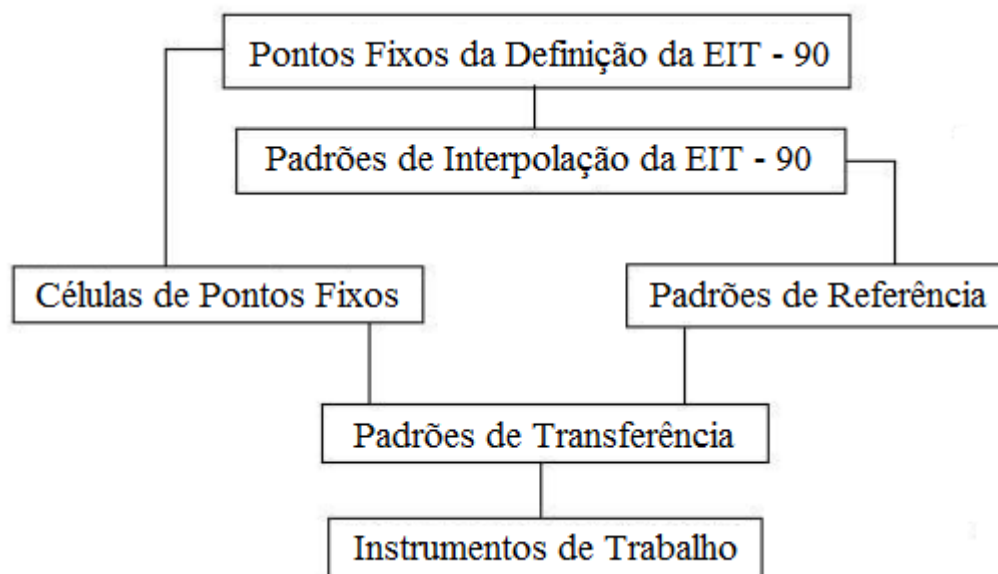


Figura 4: Sequência de rastreabilidade tradicional para temperatura, onde é possível verificar os diferentes níveis de exatidão dos padrões, numa cadeia sucessiva de calibrações, adaptado de (SANTOS, 2008).

2.5 Responsabilidade pela Rastreabilidade em Temperatura no Brasil

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO tem a incumbência por força de lei federal, através do seu Laboratório de Termometria (LATER), a missão de guardar, conservar, manter e reproduzir os padrões metrológicos nacionais de temperatura com sua disseminação e padronização em todo o território nacional. O padrão de Referência Nacional de temperatura no Brasil são as células de pontos fixos do LATER. O LATER está alocado na Divisão de Metrologia Térmica - DITER que está subordinada à

Diretoria de Metrologia Científica e Industrial - DIMCI, e possui as seguintes atribuições institucionais, além das já citadas anteriormente:

- manter a rastreabilidade de seus padrões de referência aos padrões primários internacionais, através de comparações chaves com outros países que estejam homologadas no Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) de acordo com o apêndice G;

- realizar as calibrações de padrões e instrumentos de medição de temperatura de clientes internos e externos ao INMETRO;

- realizar e dar suporte a pesquisas de novas técnicas de medição de temperatura disponibilizando-as posteriormente para a indústria nacional.

2.6 Instrumento para Medição de Temperatura

Do ponto de vista conceitual, um instrumento que mede valores de temperatura é chamado de termômetro. Estes instrumentos podem ser separados em duas classes, de acordo com a forma que os mesmos medem as variações de temperatura, conforme com a Figura 5. Existe uma classe de sensores de temperatura, como no caso dos termopares, termômetros de resistência, termômetros bimetálicos, termômetros de líquido em vidro, que necessitam estar em contato direto com o corpo cuja temperatura se deseja determinar.

A segunda classe de sensores não necessita estar em contato com os corpos a serem medidos, como é o caso dos pirômetros óticos que são sensores de infravermelho.

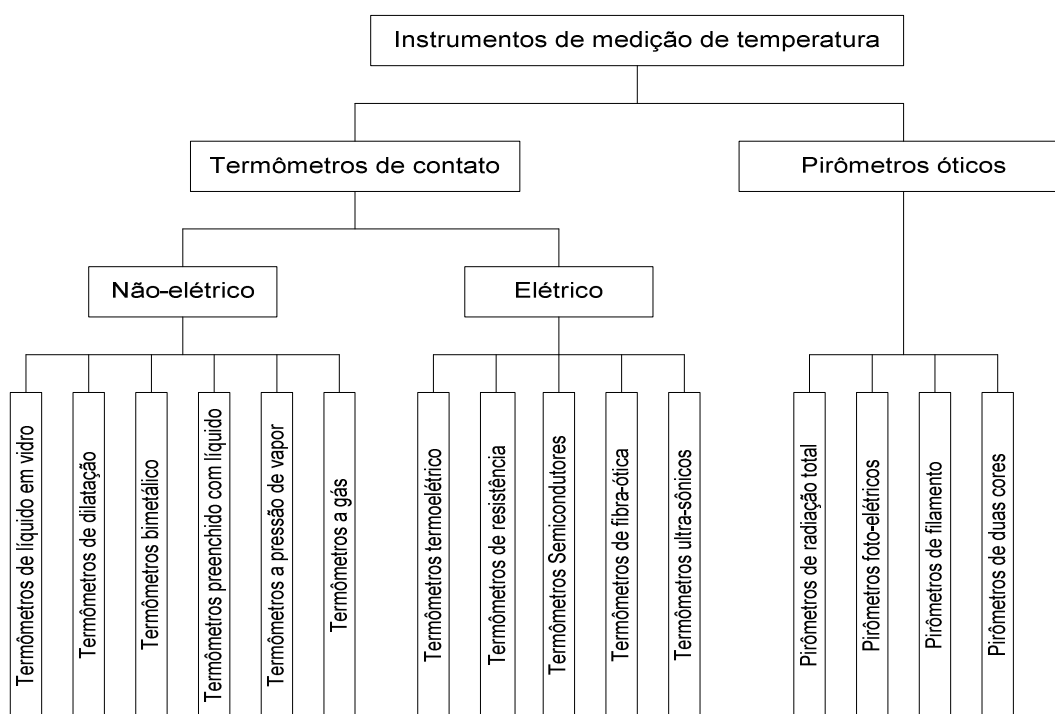


Figura 5: Diferentes tipos de medidores de temperatura, que necessitam estar em contato ou não para determinar a temperatura de um corpo, adaptado de (MICHALSKI *et al*, 1991).

Um termômetro em última análise é um instrumento de medição de temperatura constituído de diferentes elementos. Contudo, não pode prescindir de um elemento sensor, isto é, a porção do instrumento que é sensível à temperatura do corpo que se deseja medir. Desta forma, a princípio, um termômetro mede a sua própria temperatura. Logo, para que o elemento sensor do termômetro possa funcionar adequadamente, o mesmo deve estar em equilíbrio térmico com o objeto ou ambiente cuja temperatura se deseja medir, de tal forma que a temperatura do sensor do termômetro reproduza a temperatura deste objeto ou ambiente.

Então é oportuno destacar que a calibração de um termômetro por comparação, isto é, a transferência dos valores da calibração prévia de padrão de referência rastreado à Escala Internacional EIT - 90, para este termômetro é imprescindível que ambos os instrumentos estejam em equilíbrio térmico. Deste modo, este meio térmico é que garantirá a homogeneidade e uniformidade da temperatura para que as medições possam ser realizadas. Todavia, não deve se

esquecer de considerar e estudar o comportamento de estabilidade destes meios termostáticos, tais como fornos, banhos de leito líquido ou fluidizado (MICHALSKI *et al*, 1991).

2.6.1 Métodos não Óticos de Medição de Temperatura

De forma genérica, a medição de temperatura envolve o uso de transdutores calibrados que convertem a grandeza a ser medida em valores de temperatura. Como exemplo, pode-se citar as mudanças de temperatura associadas às variações volumétricas ocorridas nos termômetros de líquido em vidro, ou às variações dimensionais nos termômetros bimetálicos, ou à variação da força eletromotriz nos termopares, ou às variações de resistência nos termômetros detectores de resistência, ou às variações de energia irradiada com os termômetros de irradiação, ou alguma outra propriedade dos materiais que pode variar com a temperatura (HOLMAM, 1994; SANTOS, 2008).

No caso de medições de alta temperatura, não há grande variedade de opções de métodos de medição não óticos.

2.6.1.1. Termometria Acústica

Este método de medição de temperatura se utiliza da simples relação entre a velocidade do som em gás confinado em determinado volume e a temperatura termodinâmica para realizar medições. Com isso é possível medir valores de temperatura ao longo da trajetória de propagação das ondas sonoras, que podem ocorrer de forma unidimensional ou multidirecional. Para realizar este tipo de medição é necessário conhecer a massa do gás em questão com relativa exatidão, assim como garantir que no momento da medição a velocidade do gás seja zero. Com estas premissas iniciais estabelecidas, são gerados pulsos sonoros direcionados para o local onde se deseja medir a temperatura. Desta forma, é possível determinar o tempo de deslocamento destes pulsos sonoros que se propagam através de uma distância conhecida (DALLY *et al*, 1993).

Este método de medição de temperatura menos tradicional é de grande importância especialmente para a medição de temperatura dos gases em uma câmara de combustão, onde é praticamente inviável medir, inserindo-se uma ponta de prova na câmara em função da baixa condutividade e massa térmica dos gases e pelas influências negativas da irradiação no acoplamento da ponta de prova com as paredes da câmara (DALLY *et al*, 1993).

A principal dificuldade a ser superada neste tipo de tecnologia é que a velocidade do som é altamente dependente da composição química do gás ao longo do seu caminho de propagação, fato este que não necessariamente se mantém constante dentro da câmara de combustão. Além disso, não se deve desconsiderar que as partículas de fuligem da queima na câmara podem influenciar as ondas sonoras significativamente, podendo até acarretar grandes erros na medição. Outro ponto a ser considerado é o aumento da refração na onda sonora frontal em função dos gradientes de temperatura e massa específica do gás dentro da câmara. Estes fatores geralmente causam regime turbulento que distorce as frentes de ondas, dificultando a determinação do tempo de deslocamento com exatidão.

Para se determinar a estimativa da velocidade do gás se utiliza a seguinte equação (1).

$$v = \frac{(K_b T)^{\frac{1}{2}}}{M} \quad (1)$$

onde,

K_b = constante de Boltzman;

T = temperatura termodinâmica que se deseja medir em K;

M = massa molecular do gás.

Com a aplicação do método acústico é possível determinar a velocidade de propagação do gás e, operando a equação (1) com este valor de velocidade, se consegue obter o valor da temperatura termodinâmica desejada.

Há outra equação que pode ser empregada para este tipo de medição de temperatura a partir de ondas sonoras, mas no caso do gás utilizado ser ar seco,

sendo avaliado com pressão de referência que pode ser a pressão atmosférica, utiliza-se a seguinte equação (2).

$$v = 331,5 \sqrt{\frac{T}{273,15}} \text{ m/s} \quad (2)$$

onde,

v = velocidade do som do ar seco medida em m/s;

T = temperatura termodinâmica que se deseja medir em K.

Operando-se a equação (2) é possível se chegar à temperatura termodinâmica desejada.

Um sistema de medição como este é constituído de um transmissor e um receptor ultrassônico e um tubo selado hermeticamente com um determinado gás conhecido. O transmissor e o receptor acústicos são geralmente dispositivos cerâmicos que não ficam ligados fisicamente ao tubo selado com o gás, a fim de garantir a adequada propagação do som entre as partes envolvidas.

Outro arranjo físico dos elementos de medição é através da utilização de cristais que irão emitir e receber os sinais sonoros referentes a um gás, os quais serão inseridos em espaço confinado onde se deseja determinar a temperatura. Neste tipo de configuração, mantendo-se o volume e a massa do gás constante, não existe a necessidade da utilização de um tubo selado intermediário, como mostrado na Figura 6 (DALLY *et al*, 1993).

Na hipótese de se usar um tubo selado intermediário, cuidados devem ser tomados para prevenir indesejáveis deformações mecânicas nos tubos, assim como garantir a selagem dos mesmos adequadamente quando submetidos às elevadas temperaturas. Um material bastante empregado na confecção destes tubos é uma liga de níquel e aço denominada de “invar”.

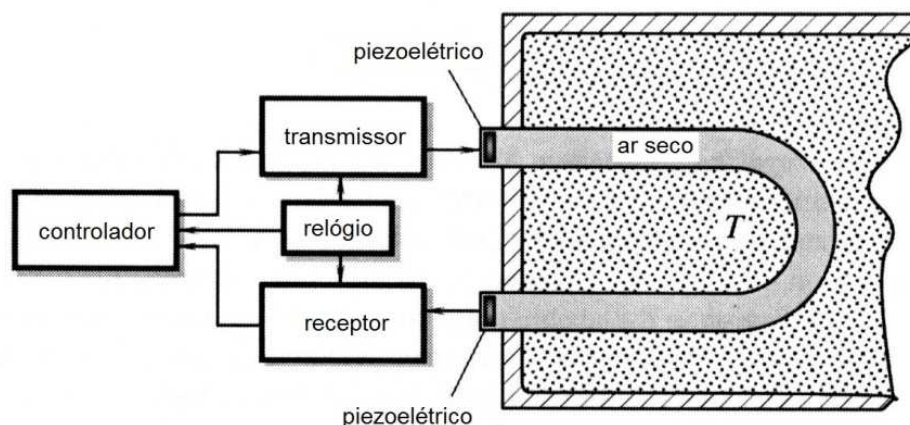


Figura 6: Esquema de um termômetro acústico, adaptado de (DALLY *et al*, 1993).

A determinação da frequência de ressonância é realizada por um relógio de aproximadamente 100 Hz que habilita o transmissor e desabilita o receptor, com um princípio de funcionamento parecido com o de um radar. Ao acionar o transmissor, um cristal piezoelétrico é excitado gerando uma onda ultrassônica que irá se propagar ao longo de todo o tubo selado com um gás. O sistema de medição habilita o cristal piezoelétrico a funcionar de modo que este já esteja operando quando a onda sonora atingir a sua superfície. Este receptor converte este sinal sonoro em um sinal elétrico transiente que será amplificado e enviado ao circuito de controle. De posse de todos esses dados, o circuito de controle pode calcular a velocidade de propagação do som no gás ao longo de sua trajetória no interior do tubo selado. Assim, com a velocidade do gás determinada e toda a formulação matemática apresentada anteriormente, pode-se calcular a temperatura desejada. Como exemplo de um termômetro que utiliza o princípio de medição acústico, pode-se citar o termômetro primário acústico do NIST, conforme a Figura 7 (www.nist.gov; FRADEN, 2010).

Com este método acústico de medição de temperatura também se pode realizar medições no interior de altos fornos. Com a utilização de um transmissor de pulsos sonoros direcionados para o interior do forno e com vários receptores distribuídos em diferentes posições internamente, é possível determinar os tempos de propagação das ondas sonoras a partir das distâncias conhecidas entre o transmissor e o receptor. Permite-se então se conhecer as diversas temperaturas e suas distribuições dentro do alto forno.



Figura 7: Fotografia do termômetro acústico primário do NIST, adaptado do site do NIST (www.nist.gov).

2.6.1.2. Termometria Termoelétrica

O termopar é instrumento de medição de temperatura constituído geralmente por uma combinação de dois fios condutores de diferentes materiais, podendo ser metais puros, ligas metálicas ou materiais não metálicos unidos pelas suas duas extremidades, de acordo com a Figura 8. Uma das extremidades é denominada de junção fria onde se adota como a junção de referência a 0°C , utilizando um banho de gelo como ambiente de estabilização deste valor de referência. A outra junção é denominada de junção quente e neste caso é a extremidade que é colocada no local que se deseja determinar o valor de temperatura.

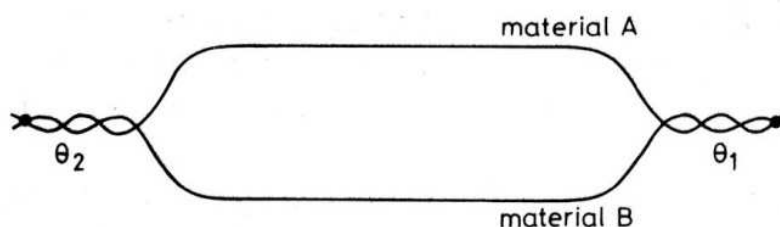


Figura 8: Esquema de montagem de um termopar, onde é possível ver as duas junções formadas por fios de metais distintos, adaptado de (LEEGH, 1997).

Estas duas extremidades das junções quando submetidas a uma variação de temperatura entre elas, produzem força eletromotriz - fem através de um circuito elétrico. O fenômeno físico associado a este tipo de medição foi chamado de efeito Seebeck em homenagem ao seu inventor. A partir da seção 2.6.1.2.2.1.1., o efeito Seebeck, assim como os demais efeitos da termoeletricidade, serão explicados em detalhes.

Pode-se dizer que os termopares se destacam dentre os demais medidores de temperatura por diversas características, tais como (SANTOS, 2008):

- baixa resistividade;
- reprodutibilidade das suas propriedades na sua fabricação;
- grande estabilidade ao longo do tempo;
- baixo coeficiente térmico de resistência;
- baixa condutividade térmica;
- dependência linear e contínua da força eletromotriz - fem com a temperatura;
- alta resistência à oxidação em atmosferas severas;
- larga faixa de temperatura de medição;
- altas temperaturas de fusão.

Pelas vantagens mencionadas anteriormente é que os termopares se tornaram instrumentos de medição de temperatura amplamente empregados, com centenas de possibilidades de combinações dos elementos na sua confecção. Os materiais mais usados na sua fabricação são as ligas de cromo e níquel denominadas de cromel, as ligas de cromo e alumínio denominadas de alumel, as ligas de cobre e níquel denominadas de constantan, as ligas de platina e ródio, fios puros de platina, fios de cobre, níquel e ferro (MICHALSKI *et al*, 1991).

Existem várias normas relacionadas com o assunto termopar sendo que as mais conhecidas são: ASTM E 1751-00, ASTM E988-96 e ASTM E230-98. Nestas normas são descritos em detalhes diversas características dos 8 tipos de termopares mais conhecidos denominados por: B, E, J, K, N, R, S e T, de acordo com a Figura 9.

2.6.1.2.1. Termopares Normalizados

a) Termopar Tipo B

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (70 % Pt, 30 % Rh - 94% Pt, 6% Rh). Uma característica peculiar é que na faixa de até 1000 °C sua fem é praticamente desprezível. Desta forma, apresenta um coeficiente de Seebeck bem reduzido e com isso não necessita de temperatura de referência para o circuito elétrico. Permite realizar medições ao longo da faixa de temperatura de 0 °C a 1700 °C com a vantagem de apresentar elevada resistência a agentes químicos e alta resistência mecânica. Sua incerteza de medição é da ordem de $\pm 0,5$ °C na faixa até 1100 °C e de ± 3 °C na faixa de 1100 °C a 1700 °C (SANTOS, 2008).

b) Termopar Tipo E

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (90 % Ni, 10 % Cr - 55 % Cu). Como peculiaridade, é o termopar que apresenta a maior fem dentre os demais termopares, podendo com isto ser utilizado para medir pequenas variações de temperatura. Permite realizar medições na faixa de - 270 °C a 800 °C. Sua incerteza de medição é da ordem de ± 1 °C, evidentemente levando em consideração o sistema de estabilização térmico (banho, forno, sais, etc.), assim como o tipo de padrão de referência (SANTOS, 2008).

c) Termopar Tipo J

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (Fe - 55 % Cu, 45 % Ni). É um dos tipos mais populares de termopares usados na indústria. Apresenta elevada fem, além de possuir grande resistência a ambientes submetidos a atmosferas corrosivas, redutoras ou inertes. Como possuem ferro em sua constituição, necessitam de proteção adequada se forem postos em contato com gases sulfurosos ou oxigênio. Permite realizar medições na faixa de - 200 °C a 850 °C. Sua incerteza de medição é da ordem de ± 1 °C, evidentemente levando em consideração também o sistema de estabilização térmico (banho, forno, sais, etc.), assim como o tipo de padrão de referência (SANTOS, 2008).

d) Termopar Tipo K

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (90 % Ni, 10 % Cr - 95 % Ni). Esta combinação dos elementos químicos deste tipo de termopar é uma das mais usadas neste segmento de medições termoeletricas. Uma das suas principais características é que possui uma excelente resposta linear entre a fem e os valores de temperatura. Possuem propriedades superiores quanto à resistência à oxidação se comparado com os tipos E, J e T. Permitem realizar medições na faixa de - 200 °C a 1100 °C. Sua incerteza de medição é da ordem de ± 2 °C, evidentemente levando em consideração o sistema de estabilização térmico (banho, forno, sais, etc.), assim como o tipo de padrão de referência (SANTOS, 2008).

e) Termopar Tipo N

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (84,5 % Ni - 14 % Cr - 1,5 % Si, 95,4 % Ni - 4,5 % Si - 0,1 % Mg). Uma característica vantajosa deste tipo de termopar é que ele apresenta elevada estabilidade térmica quando submetido a altas temperaturas. Comparado com o tipo K, que é mais tradicional, apresenta características superiores de estabilidade, durabilidade e maior resistência a corrosão. Permitem realizar medições na faixa de - 200 °C a 1300 °C (SANTOS, 2008).

f) Termopar Tipo R

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (87 % Pt, 13 % Rh - Pt). Possui características bem similares de desempenho e fragilidade aos do tipo S. Não podem ser empregados em atmosferas redutoras nem em ambientes a vácuo ou com vapores metálicos, já que podem vir a ocorrer combinações químicas indesejáveis. Permitem realizar medições na faixa de - 50 °C a 1600 °C. Sua incerteza de medição é da ordem de $\pm 0,5$ °C, evidentemente levando em consideração o sistema de estabilização térmico (banho, forno, sais, etc.), assim como o tipo de padrão de referência (SANTOS, 2008).

g) Termopar Tipo S

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (90 % Pt, 10 % Rh - Pt). Em se tratando de termopar construído a partir de metais nobres, é um dos mais

populares em termos de aplicação. Pelas características superiores dos metais nobres envolvidos, apresenta elevada resistência à corrosão, baixa inércia térmica em função dos reduzidos diâmetros dos seus fios. Como limitação de uso, não deve ser aplicado em atmosferas redutoras, pois as combinações químicas com outros elementos podem causar variações nas fems, assim como acarretar a fragilidades dos fios no circuito elétrico. Permitem realizar medições na faixa de - 50 °C a 1300 °C. Sua incerteza de medição é da ordem de $\pm 0,5$ °C, evidentemente levando em consideração o sistema de estabilização térmico (banho, forno, sais, etc.), assim como o tipo de padrão de referência (SANTOS, 2008).

h) Termopar Tipo T

Este tipo de termopar é construído de uma liga de (Cu - % % Cu, 45 % Ni). Em função da oxidação do cobre (Cu) a partir de 350 °C, cuidados devem ser tomados a partir deste valor de temperatura. A pureza do fio de cobre é de suma importância para os resultados obtidos nas calibrações com estes tipos de instrumentos. Permitem realizar medições na faixa de - 250 °C a 400 °C. Sua incerteza de medição é da ordem de $\pm 0,2$ °C, evidentemente levando em consideração o sistema de estabilização térmico (banho, forno, sais, etc.), assim como o tipo de padrão de referência (SANTOS, 2008).

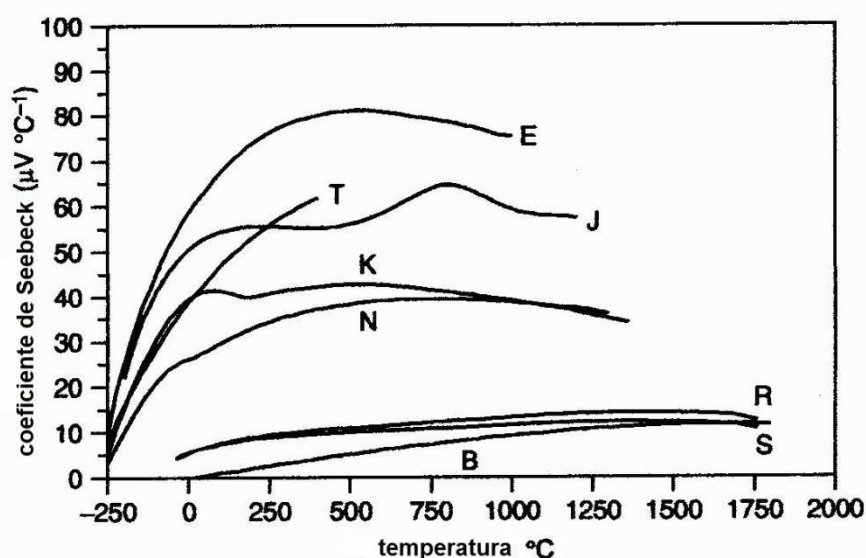


Figura 9: Esquema de fems dos termopares mais tradicionais, onde é possível verificar as diferentes curvas de respostas dos termopares em função da temperatura, adaptado de (NICHOLAS, 2001).

Existem outros tipos de termopares não normalizados como os que serão apresentados a seguir para medições de elevadíssimas temperaturas ou outros com propriedades bem especiais, como é o caso do termopar de ouro/platina, o qual foi usado nesta tese como padrão de referência para as medições de temperatura das redes de Bragg e que serão discutidos no capítulo 4, que enfoca o sistema experimental de medição.

2.6.1.2.2. Termopares para Medições em Altas Temperaturas

Para valores de temperatura acima de 1000 °C existe um grupo de termopares não normalizados, confeccionados em ligas metálicas ou elementos não metálicos, além dos outros tipos normalizados mencionados anteriormente. Na Figura 10 a seguir são apresentadas as curvas dos diferentes tipos de termopares de alta temperatura com as suas respectivas fems (MICHALSKI *et al*, 1991).

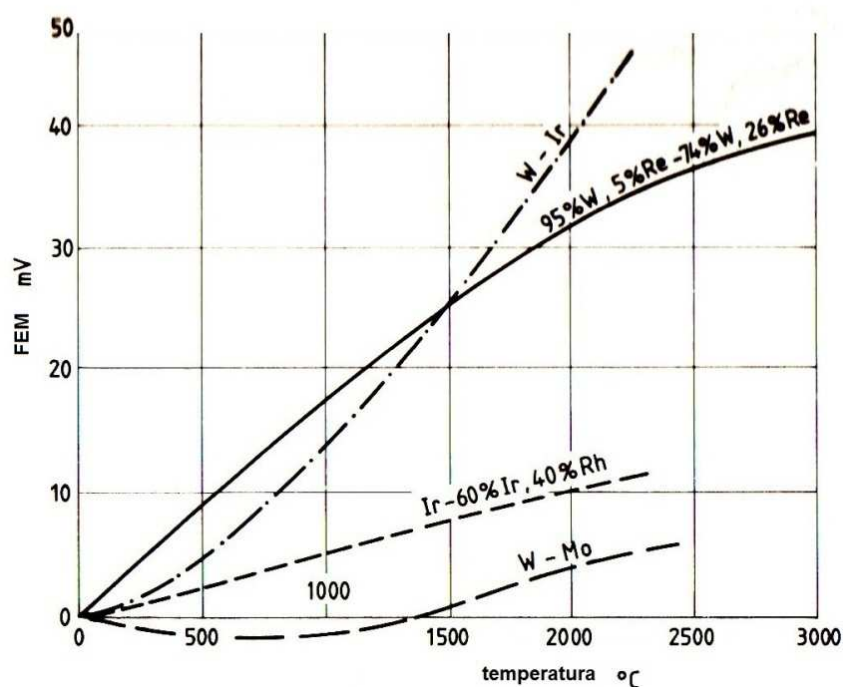


Figura 10: Esquema de fems dos termopares de alta temperatura, onde é possível verificar as diferentes curvas de respostas dos termopares em função da temperatura, adaptado de (MCGEE, 1988).

Termopar para operar em altas temperaturas tem uma característica marcante que é apresentar valores baixos de fems para valores elevados de temperatura.

Existe um número não muito grande destes tipos de instrumentos para medição de elevadas temperaturas, que serão apresentados a seguir.

a) O termopar tungstênio molibdênio (W/Mo) ou tungstênio molibdênio/tungstênio (W/MoW) apresenta algumas restrições quando submetido a atmosferas oxidantes; entretanto, pode ser usado em atmosferas redutoras. Permite realizar medições até 2400 °C (MCGEE, 1988).

b) O termopar tungstênio tungstênio/rênio (W/WRe) ou tungstênio/rênio tungstênio/rênio (WRe/WRe) tem se apresentado como uma opção interessante em função das propriedades superiores das ligas de rênio quando comparadas com ligas de molibdênio ou tungstênio. Pode ser utilizado em sistemas a vácuo ou em atmosferas que contenham hidrogênio. Apresenta restrições de uso em ambientes que contenham oxigênio, água, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Permite realizar medições até 2500 °C. É bastante utilizado para medições em reatores nucleares, descarga de gases das turbinas a gás e em isolamentos térmicos de espaçonaves (MCGEE, 1988).

c) O termopar irídio irídio/rênio (Ir Ir/Re) ou tungstênio/rênio tungstênio/rênio (WRe/WRe) possui um custo muito elevado de produção, baixas propriedades mecânicas, fems instáveis e baixa vida útil. Contudo, possui uma grande vantagem que justifica a sua aplicação que é possuir excelente resistência à oxidação. Desta forma, pode vir a ser instalado diretamente na descarga dos gases de exaustão dos motores sem a necessidade de nenhuma proteção adicional, podendo trabalhar várias horas continuamente. Permite realizar medições de até 2000 °C (MCGEE, 1988).

d) O termopar grafite tungstênio é confeccionado a partir de um tubo de grafite que atua como o eletrodo positivo, além de proteção para o fio de tungstênio que é inserido nele. Este tipo de instrumento é usado em determinações de temperatura em metais fundidos ou em atmosferas submetidas à carbonização. Permite

realizar medições de até 1800 °C em ambientes a vácuo e até 1800 °C em ambientes redutores (MCGEE, 1988).

e) O termopar grafite silício/carbono é confeccionado a partir de um tubo de uma liga de silício e carbono onde uma haste de carbono é inserida. Este tipo de montagem pode ser aparafusado ou colado. Buscou-se prevenir oxidações no dispositivo aplicando-se uma camada de Al_2O_3 na superfície do grafite. Apresenta a vantagem de poder ser utilizado em atmosferas redutoras com uma elevada fem, da ordem de 500 mV. Permite realizar medições de temperatura de até 1800 °C (MCGEE, 1988).

f) O termopar grafite grafite com 0,1 % a 0,2 % de berílio é basicamente a mesma construção do termopar citado anteriormente, podendo trabalhar em atmosferas redutoras sem nenhuma proteção especial. Permite realizar medições de até 2600 °C (MCGEE, 1988).

2.6.1.2.2.1. Princípio de Funcionamento da Termometria Termoelétrica

O princípio físico de funcionamento de um termopar se baseia na geração de uma força eletromotriz com características térmicas - fem, que está associada a gradientes de temperaturas distintos. Existem outros três princípios físicos que são desdobramentos da geração de uma fem, conhecidos como efeitos termoelétricos de Seebeck, Peltier e Thomson e estão relacionados tanto com eletricidade quanto com calor. Esses três efeitos são de grande importância para a termometria termoelétrica, sendo que o efeito Seebeck é mais difundido em medições com termopares, e os efeitos Peltier e Thomson são mais relevantes com relação ao transporte de calor por uma corrente elétrica.

Um termopar em última análise é um transdutor constituído por dois fios de diferentes metais ou ligas metálicas, unidos mecanicamente nas suas duas extremidades (junções). Uma das junções é conhecida como junção de referência ou junção fria, por estar relacionada a uma temperatura de referência conhecida;

geralmente esta temperatura de referência é obtida através de um banho de gelo num vaso Dewar, apresentado na Figura 41. A outra extremidade do termopar é denominada de junção de medição ou junção quente, visto que é a junção onde se deseja conhecer a temperatura (mensurando).

A diferença de potencial entre as duas junções, produto das diferenças de temperatura entre elas, gera uma força eletromotriz - fem com características térmicas. Para que essa fem possa ser medida se faz necessário que o circuito elétrico seja aberto em algum ponto para que um voltímetro calibrado possa medir essa tensão desejada.

A fim de evitar possíveis problemas (erros) provenientes dos efeitos das leis de temperaturas sucessivas ou intermediárias, que serão explicadas mais a frente, adotou-se que o ponto de inserção do voltímetro seria a própria junção de referência empregando fios de cobre para realizar esta ligação. Pela Lei dos metais homogêneos que também será abordada adiante, estes fios de cobre não interferem na fem térmica medida pelo voltímetro.

Uma característica diferencial do termopar em relação a outros instrumentos de medição de temperatura é que ele tem a resposta do sinal medido diretamente e relacionado com as diferenças de temperatura entre as suas duas extremidades (junções) (NICHOLAS, 2001).

2.6.1.2.2.1.1. Efeito Seebeck

O efeito Seebeck foi descoberto pelo alemão Thomas Johann Seebeck em 1821, na ocasião estava investigando os efeitos eletromagnéticos associados aos circuitos de bismuto/cobre e bismuto/antimônio. Suas observações permitiram concluir que quando duas junções formadas por fios de metais ou ligas metálicas formam um circuito elétrico fechado, e são submetidas a temperaturas diferentes, surge uma fem de características térmicas, de acordo com a Figura 11. Logo, este efeito converte energia térmica em energia elétrica. A tensão elétrica de Seebeck se dá de tal forma que a corrente no circuito elétrico é nula, ou melhor, que o circuito elétrico possui uma configuração de malha aberta (ASTM, 1969).

A polaridade, assim como a intensidade da tensão elétrica de Seebeck, são dependentes das temperaturas das junções, assim como das características dos metais com os quais os termopares são fabricados (LEIGH, 1991).

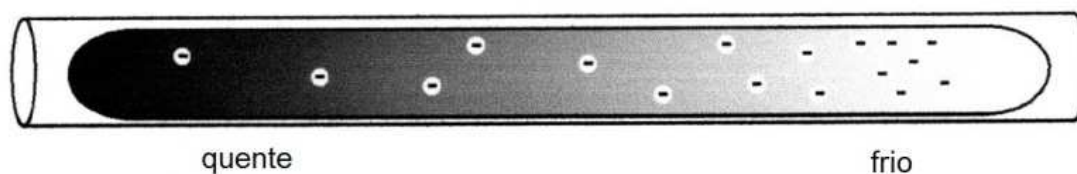


Figura 11: Representação do efeito Seebeck, onde é possível ver a trajetória dos elétrons, adaptado de (NICHOLAS, 2001).

Ao se combinar dois metais de características distintas A e B para a construção de um termopar, é possível afirmar que uma reduzida diferença de temperaturas entre as duas junções pode ser definida, de acordo com a equação (3).

$$dE_s = \alpha_{A,B} dT \quad (3)$$

onde,

$\alpha_{A,B}$ = coeficiente de proporcionalidade denominado coeficiente de Seebeck ou potência termoelétrica.

O coeficiente de Seebeck pode ser determinado de duas maneiras. Uma delas é através da diferença entre os coeficientes relativos de Seebeck $\alpha_{A,R}$ e $\alpha_{B,R}$. Utilizando um material de referência arbitrário (R) é possível se determinar a fem de cada um dos metais envolvidos A e B em relação a este material de referência. A outra maneira é utilizando os valores tabelados da tensão de Seebeck *versus* a temperatura de referência, de acordo com a seguinte equação (4).

$$E_s = \int_{T_R}^T \alpha_{A,B} dT \quad (4)$$

Objetivamente, o coeficiente de Seebeck pode ser considerado como a razão entre a variação na fem térmica de uma malha e a variação na temperatura. Pelo comentado, o coeficiente de Seebeck pode se definido pela seguinte equação (5).

$$\alpha_{A,B} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E_S}{\Delta T} = \frac{dE_S}{dT} \quad (5)$$

Se durante uma calibração com um termopar for obtida uma equação do tipo $E = aT + \frac{1}{2} bT^2$, é possível colocar o coeficiente de Seebeck em função da temperatura através da seguinte equação (6).

$$\alpha = \frac{dE}{dT} = a + bT \quad (6)$$

2.6.1.2.2.1.2. Efeito Peltier

O efeito Peltier foi descoberto pelo francês Jean Charles Athanase Peltier em 1834 quando fazia experimentos que introduziam uma pequena corrente elétrica externa a um termopar de bismuto/antimônio, já estudado anteriormente por Thomas Seebeck. Suas experiências concluíram que ao se atravessar uma pequena corrente elétrica através da junção de dois fios de metais diferentes em uma determinada direção, a referida junção perde energia térmica se resfriando e consequentemente pode vir a absorver calor do meio em que se encontra. Da mesma forma, se a direção da corrente elétrica for invertida, a junção aumenta sua energia, permitindo então a elevação da temperatura do meio em que se encontra (NICHOLAS, 2001).

Este tipo de efeito tem relação direta com a emissão ou absorção de calor a partir de características reversíveis, que geralmente ocorrem quando da passagem de uma corrente elétrica, através de uma junção feita a partir de dois materiais de características distintas. O efeito Peltier pode se manifestar através de uma

corrente elétrica induzida por um circuito elétrico externo ou através da corrente produzida internamente pelo próprio termopar (ASTM, 1969).

Desta forma, o calor produzido é proporcional à corrente elétrica que atravessa a junção e pode ser determinado pela seguinte equação (7).

$$\Phi_{A,B} I = \frac{dQ}{dt} \quad (7)$$

onde,

$\Phi_{A,B}$ = coeficiente de proporcionalidade denominado coeficiente de Peltier ou tensão de Peltier.

I = corrente elétrica que atravessa a junção;

$\frac{dQ}{dt}$ = taxa de variação do calor reversível em função do tempo.

A polaridade e a intensidade da tensão de Peltier são dependentes das temperaturas das junções, assim como das características dos metais com os quais os termopares são fabricados. Todavia, o coeficiente de Peltier ($\Phi_{A,B}$) em uma das junções é independente da temperatura na outra junção (LEIGH, 1991).

Para se obter um efeito em sentido contrário ao efeito Peltier basta resfriar ou aquecer externamente uma das junções. Se porventura for mantida a temperatura de uma das junções constantes, como no caso da junção de referência, e a temperatura da outra junção for aumentada por uma fonte de calor externa ao sistema, será induzida mesmo assim, uma corrente elétrica na malha em uma determinada direção, de acordo com a Figura 12. Já se a temperatura da junção de medição for reduzida abaixo da temperatura de referência, através de um mecanismo de resfriamento externo, a direção da corrente elétrica induzida será invertida. Deste modo, é possível observar que existe uma relação íntima entre os efeitos Peltier e Seebeck.

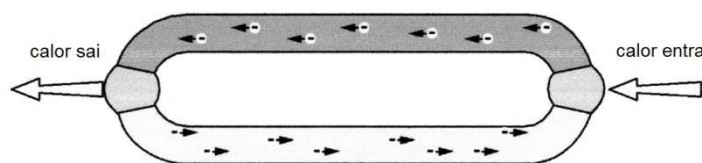


Figura 12: Representação do efeito Peltier, adaptado de (NICHOLAS, 2001).

2.6.1.2.2.1.3. Efeito Thomson

O efeito Thomson foi descoberto pelo irlandês William Thomson (Lord Kelvin) em 1854 quando tentava provar que o coeficiente de Seebeck ($\alpha_{A,B}$) e o coeficiente de Peltier (Φ_{AB}) podiam estar correlacionados através da temperatura absoluta. Thomson após inúmeras experiências concluiu que uma determinada corrente elétrica pode produzir diferentes efeitos térmicos, dependendo da direção de sua passagem, do ponto quente para o ponto frio ou vice-versa em um metal, de acordo com a Figura 13. Também observou que se uma corrente elétrica produz apenas os efeitos Peltier de aquecimento, então a tensão Peltier na malha seria igual à tensão de Seebeck e seria proporcional à diferença entre as temperaturas das junções do termopar (NICHOLAS, 2001).

Esta linha de raciocínio gera uma inconsistência em que $\frac{dE_S}{dT} \neq \text{constante}$. Entretanto, Thomson contornou esta situação concluindo que a tensão Peltier na malha não seria a única tensão gerada em um circuito elétrico de um termopar. Todavia, um único condutor por si só quando submetido a um gradiente de temperatura longitudinal seria também uma fonte de tensão.

Pode-se então confirmar que o efeito Thomson está relacionado com a emissão ou absorção reversível de calor que ocorre quando uma corrente elétrica atravessa um material condutor homogêneo, através do qual um gradiente de temperatura é mantido não importando se a corrente está sendo induzida externamente ou pelo próprio termopar (ASTM, 1969). O calor gerado ou absorvido pelo condutor é proporcional à diferença de temperatura e corrente elétrica, através da seguinte equação (8).

$$dQ_T = \pm \sigma_T I dt \quad (8)$$

onde,

σ_T = coeficiente de proporcionalidade, denominado coeficiente de Thomson.

O coeficiente de Thomson é conhecido também por uma representação de fem por unidade de diferença de temperatura. Desta forma, a tensão total de

Thomson que ocorre em um condutor pode ser descrita a partir da seguinte equação (9).

$$E_T = \int_{T_1}^{T_2} \sigma_T dT \quad (9)$$

onde,

E_T = tensão total de Thomson gerada em um condutor.

A polaridade, assim como a intensidade da tensão de Thomson, dependem do valor da temperatura, do tipo de material do condutor e da diferença de temperatura (LEIGH, 1991).

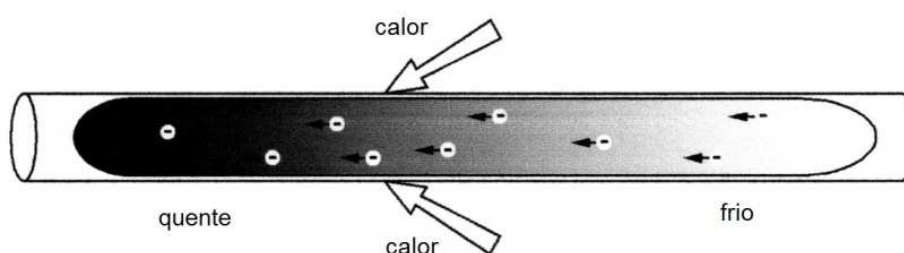


Figura 13: Representação do efeito Thomson, adaptado de (NICHOLAS, 2001).

2.6.1.2.2.1.4. Leis Fundamentais dos Circuitos Termoelétricos

Nas atividades que envolvem medições com termopares existem três leis termoelétricas fundamentais para a teoria da termoeletricidade. Através destas leis foi possível compreender todos os fenômenos que serviram de base para as medições de temperatura com termopares. Essas leis são conhecidas como Lei dos Metais Homogêneos, Lei dos Metais Intermediários e Lei das Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias (MCGEE, 1988; MICHALSKI *et al*, 1991; DALLY *et al*, 1993).

2.6.1.2.2.1.5. Leis dos Metais Homogêneos

“Uma corrente termoelétrica não pode ser mantida em um circuito de apenas um condutor homogêneo, mesmo variando-se a sua seção reta, pela aplicação simplesmente de calor” (ASTM 1969).

Logo, a força eletromotriz térmica gerada em um circuito termoelétrico, constituído a partir de dois metais homogêneos de características distintas, depende apenas de duas considerações a respeito do circuito elétrico. Uma das considerações diz respeito à diferença de temperatura entre as junções dos metais. A outra está relacionada com a composição química das ligas metálicas. Com isso, é possível concluir que não existe nenhuma influência no valor de tensão gerado pelo circuito elétrico em relação à distribuição ou gradiente de temperatura ao longo dos fios. Assim, para a fabricação de um termopar é necessário dois materiais com características diferentes.

Na Figura 14 tem-se a representação da Lei dos Metais Homogêneos, onde é possível notar em (b) que a liga do metal A está submetida a uma temperatura T_3 e a liga do metal B à temperatura T_4 . Pelo que foi exposto anteriormente, a tensão gerada em (b) será igual à tensão gerada em (a) (MICHALSKI, 1991).

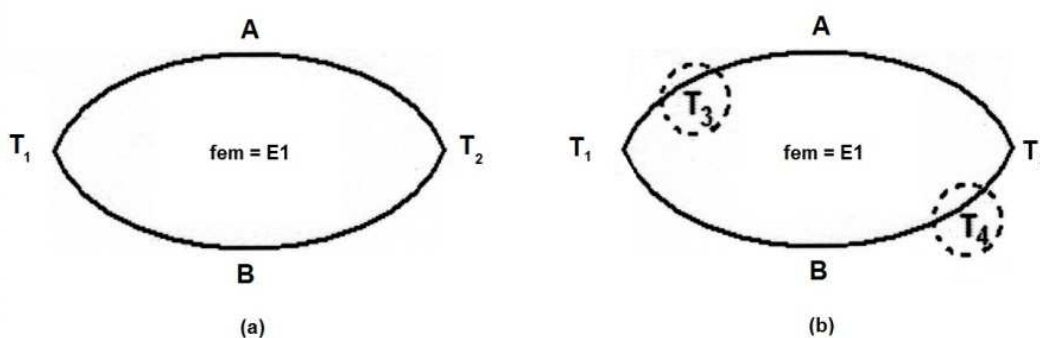


Figura 14: Lei dos Metais Homogêneos, onde é possível notar em (b) que a liga do metal A está submetida a uma temperatura T_3 e a liga do metal B à temperatura T_4 , adaptado de (MICHALSKI *et al*, 1991).

2.6.1.2.2.1.6. Leis dos Metais Intermediários

“A soma algébrica das forças eletromotrizes térmicas em um circuito formado de qualquer número de condutores diferentes é igual a zero se todo o circuito estiver em uma temperatura uniforme” (ASTM, 1969).

Em um circuito formado por dois fios de características diferentes e com suas junções em diferentes temperaturas, ao cortarem-se os fios e ligar um terceiro de características distintas, a força eletromotriz produzida originalmente não será alterada. Para isto ocorrer, é necessário que as duas junções criadas pelo terceiro fio estejam à mesma temperatura.

Na Figura 15 tem-se a representação da Lei dos Metais Intermediários, onde é possível notar que a tensão gerada em (b) será a mesma em (a), caso T_3 seja igual a T_4 , embora haja um fio C inserido na parte superior do circuito. Desta forma, é possível concluir que $T_3 = T_4$ logo, que $E_1 = E_2$, assim como também $T_3 \neq T_4$ logo, que $E_1 \neq E_2$.

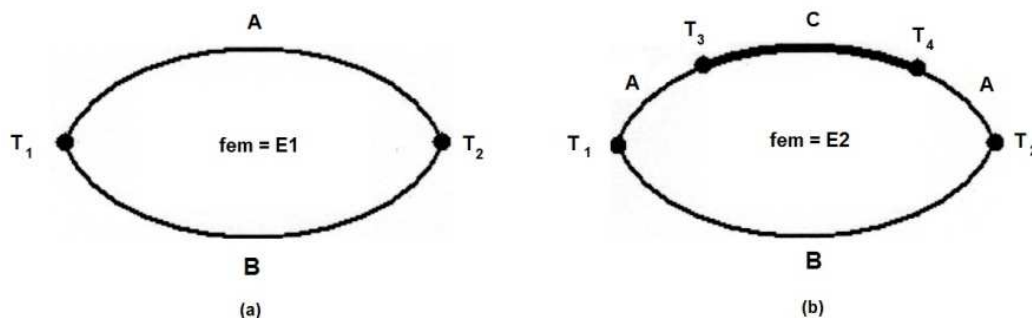


Figura 15: Lei dos Metais Intermediários, onde é possível notar que a tensão gerada em (b) será a mesma em (a), caso T_3 seja igual a T_4 , adaptado de (MICHALSKI *et al*, 1991).

2.6.1.2.2.1.7. Lei das Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias

“Se dois metais homogêneos diferentes produzem uma fem térmica E_1 , quando suas junções estão em temperaturas T_1 e T_2 e produzem uma fem térmica

E_2 , quando suas junções estão em temperaturas T_2 e T_3 , a fem gerada quando as junções estiverem em T_1 e T_2 será a soma algébrica de E_1 e E_2 ” (ASTM, 1969).

Desta forma, a tensão gerada é dependente apenas da diferença entre a junção fria e a junção quente, independente de qualquer temperatura intermediária. A Figura 16 exemplifica esta situação mencionada elétrica.

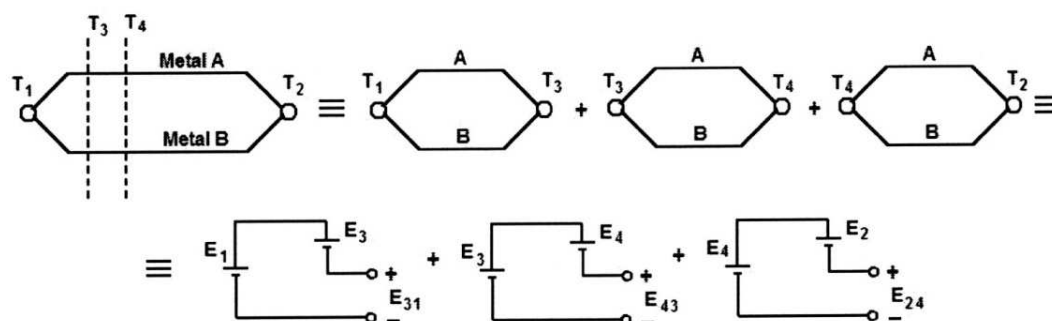


Figura 16: Lei das Temperaturas Sucessivas ou Intermediárias, adaptado de (MICHALSKI *et al*, 1991).

2.6.2 Métodos Óticos de Medição de Temperatura

O sensoriamento ótico de medições de temperatura se baseia nas medições das variações dos sinais óticos, que estão correlacionadas com estímulos físicos externos a partir de uma determinada grandeza, que podem ser: temperatura, pressão, deformação, etc..

Um sinal ótico pode ser estabelecido por diferentes características da luz como: intensidade, fase, estado de polarização e espectro. Os diferentes fenômenos físicos relacionados com estas características citadas podem ser utilizados em atividades de sensoriamento. Existe comercialmente uma variedade enorme de sensores óticos para medição de temperatura, como é caso da pirometria ótica. Todavia, nesta tese, só serão abordados os métodos óticos de medição de temperatura que empregam o sensoriamento por fibras óticas para realizar as medições, tais como: termometria ótica por expansão térmica, termometria por fluorescência, termometria baseada em dispersões óticas (Raman e Brillouin), termometria com redes de período longo (LPG) ou redes de Bragg (FBG).

2.6.2.1 Termometria Baseada em Sensor de Corpo Negro

Um sensor de corpo negro possui uma cavidade opaca (ponta de prova) na extremidade de uma fibra ótica de alta temperatura. O fluxo espectral detectado na ponta de prova está relacionado com a temperatura da cavidade através das Leis de Planck. A temperatura é obtida pela medição da intensidade espectral ou distribuição de intensidade.

Estes tipos de sensores podem operar em princípio, numa ampla faixa de temperaturas. Entretanto, a intensidade do sinal ótico é fraca nas regiões de baixas temperaturas, já que a intensidade radiante está exponencialmente relacionada com a temperatura.

Este tipo de termômetro possui um forte sinal radiante com melhor resolução em regiões de mais altas temperaturas.

A temperatura ótima de trabalho para este tipo de sensor varia de 500 °C a 1900 °C, embora já tenham sido desenvolvidos sensores que podem trabalhar numa faixa até 300 °C.

A teoria nesta tecnologia de medição é baseada nas Leis de Planck, que descrevem a distribuição espectral da radiação para um corpo negro ideal. A potência radiante (W_λ) emitida por unidade de área superficial e por unidade de comprimento de onda é dada pela seguinte equação (10).

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (10)$$

onde,

$C_1 = 1,4191044 \times 10^{-2}$ mK) é a primeira constante de radiação;

$C_2 = 1,438769 \times 10^{-2}$ mK) é a segunda constante de radiação;

λ = comprimento de onda em nm;

T = temperatura termodinâmica em que se deseja medir, em K.

A equação acima só pode ser aplicada em corpos negros ideais. Na maioria dos casos, em situações práticas de medição, a emissividade é corrigida por um fator de emissividade (ϵ). Então, a radiação usada na medição com sensor de

corpo negro é estabelecida em relação a uma estreita banda espectral $\Delta\lambda$ centrada em λ_0 . A potência total irradiada (W_T) detectada a partir de uma dada temperatura, é calculada pela seguinte equação (11).

$$W_T = \frac{C_1}{\lambda_0^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_0 T}\right) - 1} \varepsilon \Delta\lambda S \delta \quad (11)$$

onde,

S = área da superfície submetida à radiação observada;

λ_0 = comprimento de onda centrado numa banda de onda em nm;

δ = sinal do fator da trajetória.

A observação da trajetória da radiação da cavidade é realizada através de uma fibra ótica isolada do meio exterior que detecta as variações da refração no ar e outros efeitos de perturbação. Devem-se tomar cuidados especiais com possíveis curvaturas nas fibras ou em pontos de conexão, pois podem acarretar erros no fator da trajetória δ .

Adicionalmente, pode ser determinada a energia total emitida pelo corpo negro (w_{total}) nestes tipos de termômetros de radiação, através das Leis de Boltzman, utilizando a seguinte equação (12).

$$W_{total} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (12)$$

onde,

ε = fator de emissividade;

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$);

T = temperatura termodinâmica que se deseja medir, em K.

Algumas correções são necessárias em medições realizadas com instrumentos que utilizam a equação (12), visto que a maioria dos fotodetectores usados nestas medições possui respostas limitadas em determinadas regiões de comprimento de onda.

Plotando-se a potência (W_λ) *versus* o comprimento de onda para diferentes temperaturas verifica-se que para valores crescentes de temperatura mais energia é emitida, convergindo para as Leis de Planck. Consequentemente, o pico de emissão se desloca no espectro para um comprimento de onda menor. A determinação do pico do comprimento de onda de emissão $\lambda_{\max}$ (μm) pode ser calculado através das Leis de Wien, utilizando a equação a seguir (13).

$$\lambda_{\max} = \frac{2889}{T} \mu\text{m} \quad (13)$$

onde,

T = temperatura termodinâmica que se deseja medir, em K.

A configuração para um sensor de cavidade de corpo negro é basicamente formada por um gerador (cavidade de corpo negro), um sistema de transmissão dos dados óticos (fibras óticas de alta temperatura) e um sistema ótico de detecção. É evidente que em situações reais de medição deve-se ainda acrescentar um sistema eletrônico de processamento dos valores de temperatura lidos, um amplificador de sinais, um conversor A/D e um computador, como apresentado na Figura 17 (YU, 2009).

Como exemplo de um sensor simples e barato, que utiliza esta tecnologia de medição, pode-se citar o fotodiodo de silício. Este dispositivo de medição permite operar numa larga faixa de resposta em comprimento de ondas, sendo adequado para detectar radiações emitidas por corpos negros entre 450 °C até 2000 °C. A aplicação de outros elementos químicos, como o germânio, pode ampliar ainda mais a faixa de medição de temperatura; todavia, há perda de sensibilidade.

Os termômetros que usam as cavidades de corpo negro para medir radiações são mais adequados e eficientes para medições de altas temperaturas, não sendo recomendados para baixas temperaturas devido às influências ambientais (YU, 2009).

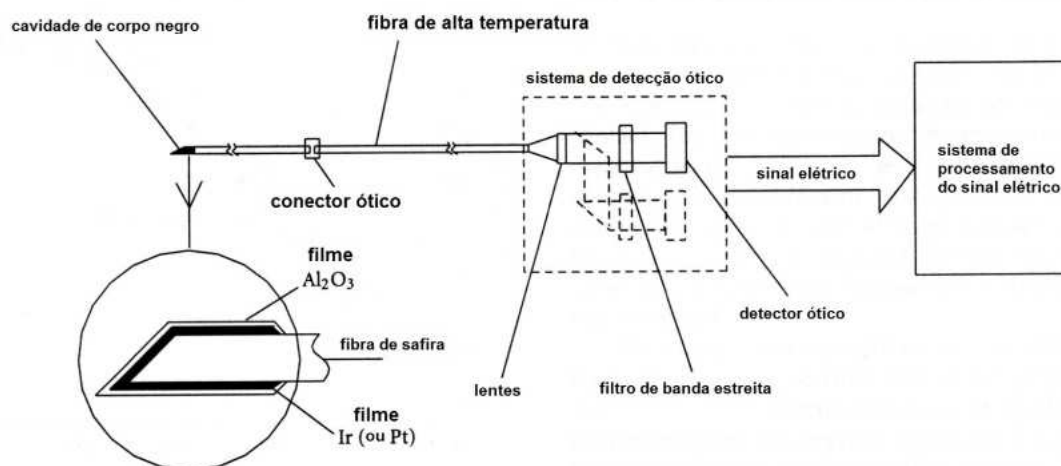


Figura 17: Representação da cavidade de corpo negro na fibra, adaptado de (YU, 2009).

2.6.2.2 Termometria Baseada em Expansão Térmica

O princípio interferométrico Fabry-Perot (F-P) pode ser empregado para realizar medições pontuais de temperatura. Os conceitos óticos relativos a esta tecnologia patenteada de medição, empregam um interferômetro de luz branca como elemento principal. Um sensor de temperatura F-P é constituído por dois espelhos semi-reflexivos perfeitamente planos e paralelos, separados por um determinado intervalo reduzido. A luz incide no primeiro espelho e posteriormente é refletida para o segundo espelho e continuamente refletida de um lado para dentro do intervalo reduzido inúmeras vezes. Uma pequena parcela do feixe de luz incidente escapa do interferômetro em cada reflexão, acarretando um grande número de feixe de luz paralelo. Ao final das sucessivas reflexões, a luz retorna ao sistema de interrogação através de uma fibra ótica por um acoplador 2 x 2, sendo redirecionada para um analisador de espectro ótico que possui um detector linear (formato de cunha). Este detector linear interferométrico reconstitui espacialmente os padrões de interferência construtivos e destrutivos. Como a fonte de luz é de banda larga, todos os comprimentos de ondas são passíveis de serem medidos com suas respectivas interferências destrutivas, exceto para a ordem zero, onde todos os comprimentos de onda são construtivos, conforme mostrado na Figura 18.

A grande vantagem deste tipo de medição interferométrica de temperatura é que são medições absolutas, isto é, o sensor pode ser desconectado e reconectado e ainda assim apresentar os mesmos valores, sem a necessidade de ajustes adicionais (PINET, 2009; PINET *et al*, 2010).

Em função do tipo de fonte de luz e de algumas peculiaridades do sistema de detecção, esta tecnologia de medição permite trabalhar com taxas de amostragens da ordem de kHz, que atendem a maioria das aplicações de medição de temperatura (ZHANG, 2007).

Do ponto de vista comercial, existem duas principais tecnologias de fabricação de sensores F-P para medição de temperatura: a do tipo capilar ou a do tipo índice de refração. No tipo capilar, o comprimento da cavidade do sensor F-P é dependente diretamente da expansão térmica do material para a determinação da temperatura.

O projeto do sensor capilar consiste basicamente de duas extremidades de fibras óticas que são montadas em um tubo capilar de quartzo formando uma cavidade F-P. O material de uma das fibras é selecionado de forma que possua um alto coeficiente de expansão térmico. Quando a temperatura se eleva, a fibra se expande e reduz o comprimento da cavidade F-P. Assim, a variação do comprimento da cavidade pode ser transformada em valores de temperatura. O tempo de resposta deste tipo de sensor depende da forma como o mesmo é encapsulado, podendo variar na faixa de 1 ms até 0,5 s.

O outro tipo de sensor de temperatura F-P considera a relação de dependência entre o índice de refração do meio e a temperatura. Ele é fabricado com um minúsculo “chip” feito de um material semicondutor com alta dependência térmica em relação às variações do índice de refração de duas superfícies semi-reflexivas que formam uma cavidade F-P sendo que estas superfícies se posicionam na extremidade de uma fibra ótica. Esta concepção compacta de sensor de temperatura usando fibra ótica é uma das menores existentes no mercado.

Comparando os dois tipos de sensores, o tipo capilar possui uma melhor sensibilidade, contudo o que considera o índice de refração pela sua reduzida massa térmica possui melhor tempo de resposta, mostrando-se bastante interessante como opção para mapeamento de pontos de temperatura ou em medições rápidas.

A tecnologia de sensoriamento F-P para medições de temperatura é bem versátil, visto que utiliza condicionadores de sinais universais que barateiam significativamente os custos operacionais.

Sensores F-P construídos com fibras óticas de sílica podem medir temperaturas de até 800 °C. Já os que são fabricados com cristais de safira podem atingir temperaturas da ordem de 1500 °C (YU, 2009).

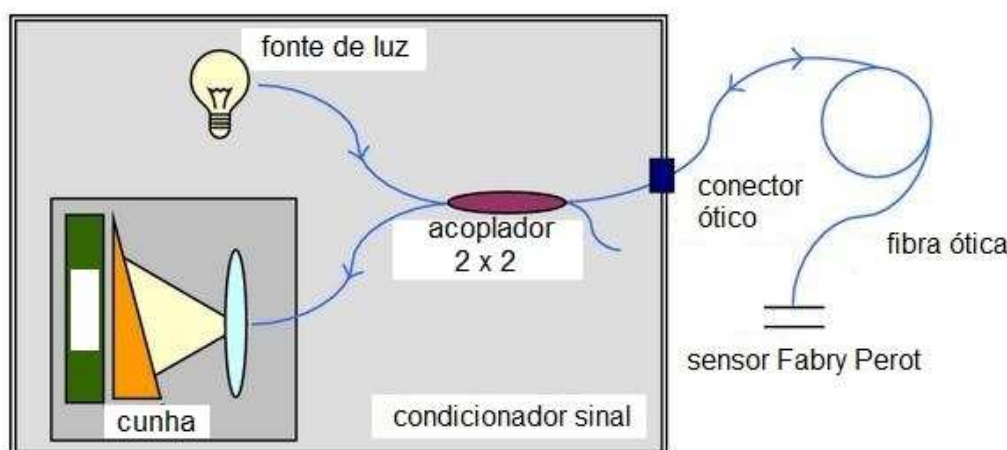


Figura 18: Representação esquemática sistema interferométrico de medição de temperatura Fabry-Perot, adaptado de (YU, 2009).

2.6.2.3 Termometria por Fluorescência

A tecnologia de fluorescência relaciona o tempo de decaimento fluorescente ou intensidade de fluorescência de determinados materiais com a temperatura. Um sensor deste tipo utiliza geralmente um composto de fósforo que emite um sinal fluorescente, em resposta a uma excitação feita pela luz. O elemento químico pode ser excitado com altas energias, através de pequenos pulsos de luz, geralmente na região do espectro do ultravioleta (UV) com comprimentos de onda entre 400 nm a 420 nm (YU, 2009; PINET *et al*, 2010).

Uma das possibilidades de medição de temperatura com este tipo de sensor é a pintura do composto fluorescente diretamente na superfície a ser iluminada e exposta a um pulso de luz ultravioleta, enquanto se observa a radiância da superfície (brilho). O perfil do sinal de resposta ao pulso ultravioleta é uma função da temperatura da superfície. É possível medir com estes sensores uma ampla

faixa de temperaturas, analisando a resposta de radiância e o respectivo tempo de decaimento. Com o intuito de minimizar interferências entre os sinais de excitação e emissão podem ser usados filtros passa-banda, que separam adequadamente os referidos espectros (YU, 2009; PINET *et al*, 2010).

Nesta tecnologia, a energia quântica induz a movimentação dos elétrons de um estado fundamental para um estado de excitação. Estes elétrons conseguem se movimentar com maior ou menor velocidade e, dependendo da intensidade da excitação, podem até retornar ao estado fundamental, conforme a Figura 19.

O método da fluorescência utiliza fibras óticas multimodo que permitem a captura parcial da luz emitida pelo composto fluorescente através de um detector de luz de banda larga que possui um fotodiodo ou um fototransistor. Com o objetivo de captar a maior quantidade de luz refletida neste sistema ótico, pode-se usar uma fibra ótica de núcleo largo (YU, 2009).

A intensidade da luz é separada em duas fases distintas quando se realiza medições ao longo do tempo. A primeira está relacionada com o tempo de decaimento da fluorescência (τ), onde o decréscimo da luz emitida pode ser determinado entre os tempos t_1 e t_2 após a emissão do pulso de excitação em t_0 .

O tempo de decaimento deste método está diretamente relacionado com a temperatura do composto fluorescente e apresenta um comportamento exponencial da ordem de 1 a 4 ms de acordo com a Figura 19 (PINET, 2009).

Como a termometria por fluorescência se baseia nas variações da intensidade da luz ao longo do tempo, atenção especial deve ser dada quando da utilização de fibras óticas com núcleos maiores, pois estes tipos de fibras ao ser curvadas vão sofrer atenuação do sinal ótico prejudicando os resultados de medição.

Devido à forma como o sinal ótico é obtido e processado fica difícil para este tipo de sensoriamento apresentar taxas de aquisição velozes, limitando sua utilização em casos de medições de temperatura que necessitem de uma resposta dinâmica imediata.

O nível de exatidão alcançado com esta tecnologia está diretamente relacionado com o tipo de material fluorescente utilizado e suas respectivas propriedades eletrônicas, estabilidade, resistência térmica, etc.. Atenção especial também deve ser dada no que se refere ao projeto de construção e ao sistema de processamento das informações referentes a estes tipos de sensores.

Esta opção de medição de temperatura já existe há aproximadamente 15 anos no mercado, cobrindo uma faixa de trabalho de - 30 °C até 200 °C, com uma incerteza de medição da ordem de ± 2 °C. Seu custo de produção não é muito elevado, visto que pode usar uma versão modesta empregando um fotodiodo emissor de luz (Led) ultravioleta e um fotodetector de silício como elementos principais do sistema de interrogação (PINET, 2010; FRADEN, 2010).

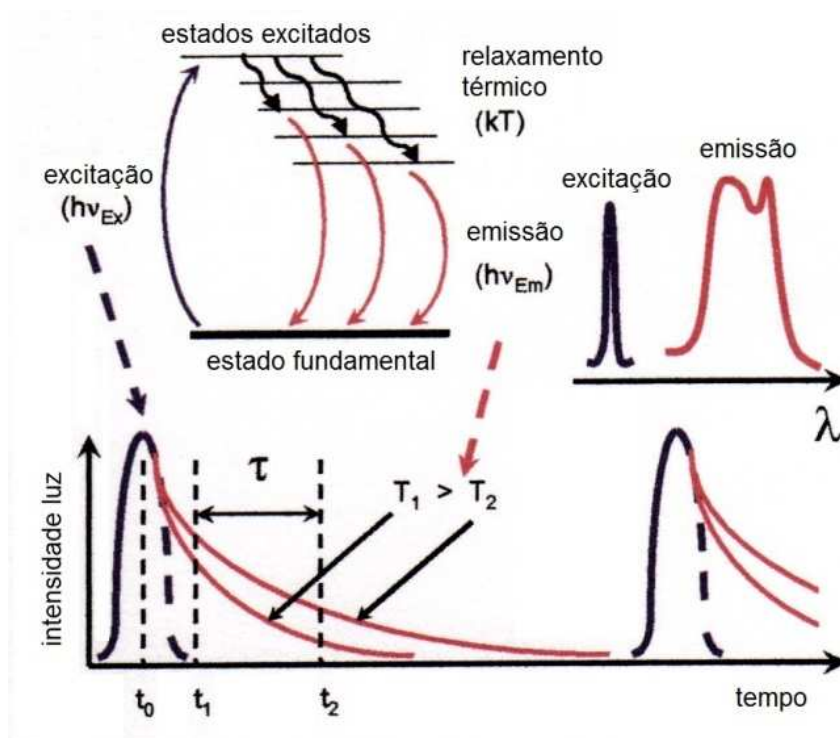


Figura 19: Descrição esquemática da tecnologia de decaimento fluorescente. A transição eletrônica (esquerda, topo), espectro de excitação e emissão típicos (direita, topo), intensidade da luz refletida em função do tempo, adaptado de (PINET, ELLYSON, BORNE, 2010).

2.6.2.4 Termometria Baseada em Intervalo de Banda Semicondutora

Esta tecnologia de medição de temperatura utiliza um pequeno “chip” semicondutor com uma superfície espelhada que é instalado na extremidade de uma fibra ótica multimodo. Apesar de teoricamente vários materiais semicondutores poderem ser usados, o que apresentou melhor eficiência e aceitação comercial foi o semicondutor GaAs (PINET *et al*, 2010).

O sistema de interrogação para este tipo de sensor emprega uma fonte de luz de banda larga, que pode ser uma lâmpada de bulbo halogênia a fim de iluminar o “*chip*” semiconductor através de uma fibra multimodo. Desta forma, os fótons com suficiente energia são absorvidos através de colisões elásticas com os elétrons livres da banda de valência e que podem se deslocar para a banda de condução. Ambas as bandas estão separadas por um intervalo de energia (E_g , cuja unidade é o eV) sendo que sua intensidade dependerá da estrutura semicondutora, da pressão hidrostática e da temperatura.

Em se tratando apenas das medições de temperatura com este sensor, esta pode ser determinada a partir da seguinte equação (14).

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (14)$$

onde,

$$E_g(0) = 1,519 \text{ eV};$$

T = temperatura termodinâmica que se deseja medir em K ($0 \text{ K} < T < 10^3 \text{ K}$) para o semiconductor GaAs, na pressão atmosférica;

$$\alpha = 0,541 \times 10^{-3} \text{ eV/K};$$

$$\beta = 204 \text{ K}.$$

A pressão hidrostática não influencia tanto o intervalo de energia (E_g) como a temperatura. Para esclarecer esta afirmação, uma variação de pressão de 1 atm na pressão atmosférica acarreta no intervalo de energia uma variação de $\Delta E_g = 1,1 \times 10^{-5} \text{ eV}$. Mas ao se considerar uma variação de temperatura de 20 K para 300 K, o intervalo de energia apresenta um decréscimo de $\Delta E_g = -9,1 \times 10^{-3} \text{ eV}$.

Quando um circuito integrado “*chip*” semiconductor é iluminado por uma fonte de luz, seus fótons interagem com os elétrons devido às diferenças de energias entre ambos e esta energia pode ser calculada a partir da seguinte equação (15).

$$E_\gamma(\lambda) = \frac{hc}{e\lambda} \approx \frac{1239,84}{\lambda} \quad (15)$$

onde,

E_γ = energia do fóton em eV;
 λ = comprimento de onda do fóton em nm;
 h = constante de Planck;
 c = velocidade da luz no vácuo;
 e = valor absoluto da carga elementar do elétron.

Observam-se com os cálculos anteriores que fótons com alta energia (baixos λ) são absorvidos quando a energia deles for maior que a energia do intervalo ($E_g > E_\tau$). Já os fótons com baixa energia (altos λ), atravessam o intervalo semiconductor e são refletidos na superfície espelhada do “chip”, retornando ao interrogador por uma fibra ótica. A luz que retorna possui comprimentos de onda similares a um filtro passa-alta. Esta luz capturada de volta tem seu espectro analisado e a partir dele se consegue determinar o valor da temperatura medida pelo sensor fluorescente, de acordo com a Figura 20 (PINET, ELLYSON, BORNE, 2010).

Uma vantagem desta tecnologia é que os valores de temperaturas são codificados em comprimentos de onda, ao invés da intensidade da fonte de luz, que poderia apresentar valores distorcidos devido a atenuações por curvatura na fibra ótica ou instabilidades da fonte luminosa.

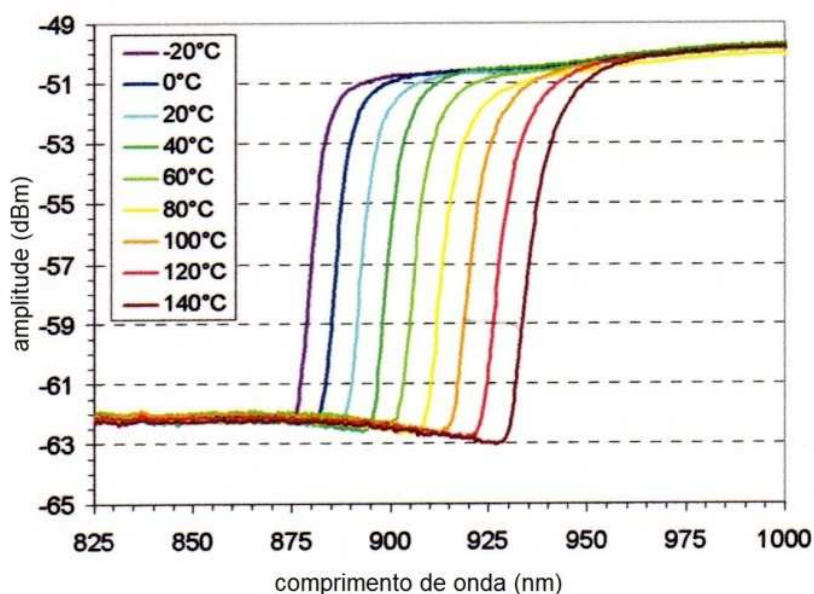


Figura 20: Espectros refletidos do sensor semiconductor de GaAs medidos através de um analisador de espectro ótico (OSA) na faixa de temperatura de - 20 °C até 140 °C em vinte passos, adaptado de (PINET, ELLYSON, BORNE, 2010).

2.6.2.5 Termometria Baseada em Espalhamento Ótico

As medições de temperatura utilizando dispersões óticas se baseiam no fenômeno eletromagnético chamado de espalhamento ótico, que é decorrente da interação entre a radiação (luz) proveniente de uma fonte laser na região do infravermelho e as características intrínsecas da sílica nas fibras óticas (TAKEI *et al*, 2009; INAUDI, 2006).

Com o aumento no conhecimento dos princípios óticos relacionados aos fenômenos de espalhamento ótico, foi possível passar de uma visão acadêmica para uma abordagem voltada à área de sensoriamento, com aplicações em medições distribuídas para as grandezas temperatura e deformação ao longo do comprimento das fibras óticas (TAKEI *et al*, 2009).

Atualmente, as medições distribuídas em temperatura estão completamente consolidadas como uma opção de sensoriamento e são muito usadas em medições de grandes edificações civis, monitoramento em túneis de metrô, avaliação térmica de sistemas de refrigeração em grandes conglomerados empresariais, monitoramento e prevenção de incêndios, etc..

Em se tratando de espalhamento ótico, estes podem ocorrer de forma espontânea ou estimulada. Também podem apresentar características elásticas ou inelásticas. Diz-se que um espalhamento é elástico quando os fótons espalhados apresentam a mesma frequência e energia da luz incidente original. Já no espalhamento inelástico o comprimento de onda da luz espalhada é diferente do comprimento de onda da luz original incidente sendo que os fótons podem ganhar ou perder energia, produzindo um deslocamento do espectro de frequência.

A luz retro-espalhada “*backscatter*” no processo de espalhamento ótico pode possuir três componentes distintas entre si: (1) a componente denominada espalhamento Rayleigh, que é o principal tipo de espalhamento ótico e está associado às diferenças de homogeneidade da estrutura cristalina da sílica durante o processo de fabricação, causando flutuações no índice de refração. Dentre as três componentes é a maior em magnitude e possui a mesma frequência da luz incidente original; (2) a componente do espalhamento Raman; (3) a componente do espalhamento Brillouin (GRATTAN, 2000).

A Figura 21 representa esquematicamente o espectro da luz espalhada em uma fibra ótica, assumindo que o comprimento de onda λ_0 é propagado pela fibra ótica. Ambos os efeitos de espalhamento estão associados a não-homogeneidades da sílica, produzindo com isso diferentes características espectrais (INAUDI, 2006).

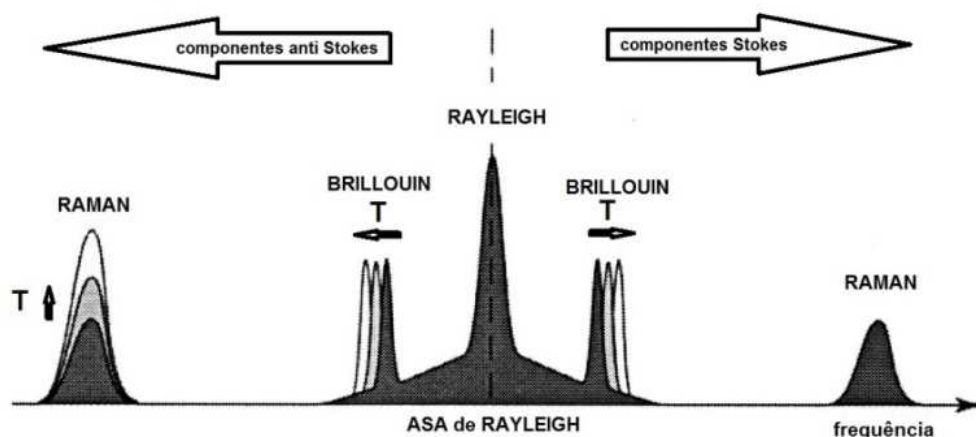


Figura 21: Representação esquemática de um espectro de luz espalhada para um sinal de propagação de comprimento de onda. Um aumento na temperatura da fibra produz efeitos nas suas componentes Raman e Brillouin, adaptado de (INAUDI, 2006).

a) Espalhamento Raman

O efeito Raman é caracterizado por ser um espalhamento inelástico e não linear, onde ocorre uma interação entre os fótons de uma fonte de luz (laser) e as moléculas do meio ótico (fônons), produzindo uma vibração acústica, representada por uma onda acústica quase uniforme.

Quando um feixe de luz (laser) se propaga numa fibra ótica (denominado feixe de bombeamento), ocorre uma transferência de fótons para uma nova frequência. Com isso, produzem-se dois outros comprimentos de ondas adicionais deslocados do comprimento original da onda de bombeamento.

O deslocamento da luz retro-espalhada para trás em relação à frequência original (ganho de energia) é chamada de componente anti-Stokes, sendo sensível às variações de temperatura ao longo da fibra ótica. O deslocamento à frente da frequência original (perda de energia) é chamado de Stokes e não é afetado pelas

variações de temperatura. Os deslocamentos anti-Stokes e Stokes são da ordem de THz (LANTICQ *et al*, 2010).

A determinação da temperatura pelo efeito do espalhamento Raman se baseia na taxa entre as componentes anti-Stokes e Stokes, que contêm as informações de temperaturas, e estão relacionadas com as diferentes posições ao longo da fibra. Como a magnitude da luz espalhada de retorno é relativamente baixa, é necessária ao se calcular a taxa entre as componentes anti-Stokes e Stokes um sistema de filtragem adequado para as frequências relevantes (TAKEI *et al*, 2009; GRATAN, 2000).

Neste tipo de espalhamento se usa fibras óticas multimodo devido à sua maior abertura numérica, o que maximiza a intensidade da luz para as medições de temperatura. Entretanto, estes tipos de fibras óticas apresentam o inconveniente de possuírem significativas perdas e atenuações do sinal ótico original, limitando sua utilização para distâncias não superiores a 10 km. A determinação da taxa de variação entre as componentes anti-Stokes e Stokes é calculada a partir da seguinte equação (16) (LANTICQ *et al*, 2010).

$$\frac{IR_{AS}}{IR_S} = \left[\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right]^4 \exp \left(\frac{hc\Delta\nu}{kT} \right) \quad (16)$$

onde,

λ_{AS} = comprimento de onda anti-Stokes em nm;

λ_S = comprimento de onda Stokes em nm;

$\Delta\nu$ = separação em frequência entre as componentes anti-Stokes e Stokes e a luz do espalhamento Rayleigh;

h = constante de Planck;

c = velocidade da luz;

k = constante de Boltzmann;

T = temperatura absoluta no núcleo da fibra sob medição.

Na Figura 22 é apresentado o esquema de funcionamento do espalhamento Raman. A variação da intensidade com o tempo corresponde às diferentes temperaturas em posições distintas na fibra ótica, sendo que estas diferentes posições são multiplicadas pelo tempo de atraso de propagação do espalhamento Raman em relação à velocidade de propagação da luz na fibra ótica (TAKEI *et al*, 2009).

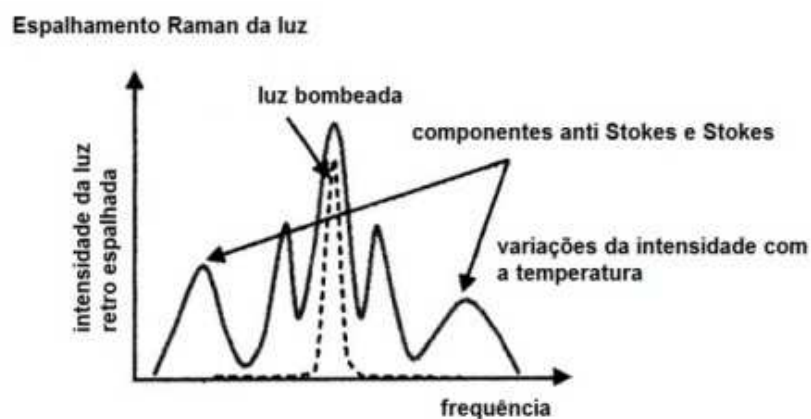
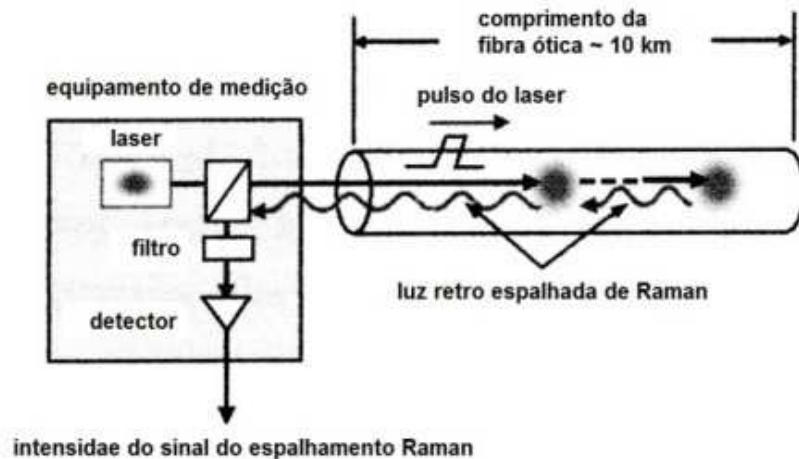


Figura 22: Representação esquemática da medição de temperatura pelo espalhamento Raman, adaptado de (TAKEI *et al*, 2009).

b) Espalhamento Brillouin

Este tipo de espalhamento é não-linear decorrente da interação entre um campo ótico de bombeio e uma onda acústica proveniente da excitação térmica do material da fibra ótica. Quando uma onda eletromagnética (chamada de onda bombeada) incide em um meio ótico (fibra), acarreta uma perturbação neste meio, fazendo-o vibrar e produzindo frequências deslocadas (anti-Stokes e Stokes) da ordem de GHz. Devido à fotoelasticidade do material da fibra ótica, as ondas acústicas (ondas de pressão), que se propagam com a velocidade do som (V_A) na sílica, induzem uma modulação no índice de refração da fibra ótica através de efeitos óticos elásticos (ANACLETO, 2007).

A velocidade de propagação da onda acústica no espalhamento Brillouin possui uma dependência estreita com a densidade do meio ótico de propagação da onda, além da temperatura e deformação. Sob uma destas influências físicas, as frequências de Brillouin são deslocadas além ou aquém da onda bombeada, de forma que cada ponto da fibra ótica funciona como um sensor individual. Com isso, é possível mapear a distribuição de temperatura ou deformação, monitorando os deslocamentos da frequência de Brillouin ao longo de toda a fibra ótica (HORIGUCHI, 1992).

Para satisfazer as condições de acoplamento entre os parâmetros óticos e acústicos é que se calcula a frequência de Brillouin pela seguinte equação (17).

$$V_B = \frac{2n_{\text{eff}}V_A}{\lambda_0} \quad (17)$$

onde,

n_{eff} = índice de refração do meio ótico;

λ_0 = comprimento de onda da luz incidente original em nm;

V_A = velocidade do som na sílica m/s.

O sensoriamento por espalhamento Brillouin consiste na determinação da frequência de Brillouin (V_B), assumindo que ela é proporcional às variações de temperatura (ΔT) ou deformação (ϵ) e pode ser determinada pela seguinte equação (18).

$$\Delta V = C_T \Delta T + C_\epsilon \epsilon \quad (18)$$

onde,

C_T e C_ϵ = características de construção das fibras óticas monomodo.

Considera-se que a onda incidente original possui um comprimento de onda λ_0 de 1550 nm, produzindo os seguintes valores de C_T e C_ϵ .

$C_T = 1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$;

$C_\epsilon = 0,05 \text{ MHz}/\mu\epsilon$.

A informação local sobre o deslocamento da frequência de Brillouin geralmente é obtida usando uma técnica de sensoriamento similar ao “*optical time domain reflectometry (OTDR)*”, onde a resolução espacial é determinada pela largura temporal do pulso ótico propagado na fibra ótica e através da análise do espectro de frequências.

O sensoriamento com o espalhamento Brillouin possui grande eficiência nas medições distribuídas de temperatura e deformação, pois utiliza fibras óticas monomodo que possuem baixas perdas e atenuações dos sinais óticos originais. Desta forma, esta tecnologia se presta a realizar medições em grandes distâncias, sem problema algum de descaracterização destes sinais.

2.6.2.6 Termometria Baseada em Redes de Período Longo (LPG)

Esta tecnologia de sensoriamento para medição de temperatura possui características similares à tecnologia de redes de Bragg (FBG), em função do sinal de saída ser codificado em comprimentos de onda.

De uma maneira geral, as redes de período longo (LPG) são fabricadas através da modulação do índice de refração dos núcleos das fibras óticas fotossensíveis, submetidas às radiações de uma fonte laser ultravioleta sendo estas absorvidas pelas fibras, conforme mostrado na Figura 23. Aplicando-se estas radiações, criam-se bandas de atenuação no espectro de transmissão com distintos comprimentos de onda. A relação entre o comprimento de onda λ e o período da rede Λ é dada pela seguinte equação (19).

$$\lambda = (n_{\text{nu}}^{\text{eff}} - n_{\text{r}}^{\text{eff}})\Lambda \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (19)$$

onde,

$n_{\text{nu}}^{\text{eff}}$ = índice de refração efetivo do modo do núcleo;

$n_{\text{r}}^{\text{eff}}$ = índice de refração efetivo do modo do revestimento;

Λ = período ou intervalo da rede LPG;

m = ordens de difração.

Derivando-se a equação (19), é possível determinar os coeficientes de sensibilidade, através da seguinte equação (20).

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{\text{eff}})} \left(\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} - \frac{dn_r}{dT} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (20)$$

onde,

λ = comprimento de onda central da banda de atenuação;

T = temperatura termodinâmica que se deseja medir, em K;

$n_{\text{nu}}^{\text{eff}}$ = índice de refração efetivo do modo do núcleo;

n_r^{eff} = índice de refração efetivo do modo do revestimento;

Λ = período ou intervalo da rede LPG;

L = comprimento da rede LPG;

Analisando-se a equação (20), pode-se notar que a sensibilidade à temperatura depende de dois fatores que são o tipo de material da fibra ótica e os efeitos da onda guiada. O material da fibra ótica está relacionado com as mudanças nos índices de refração efetivos do núcleo e do revestimento quando submetidos a variações de temperatura, além da sua composição química. A onda guiada influencia as mudanças de periodicidade para mais ou para menos nas LPGs, que dependem da ordem do modo do revestimento da fibra ótica.

As LPGs são fabricadas a partir de fibras óticas fotossensíveis que são submetidas à exposição de um laser Excimer KrF, que emite radiação ultravioleta de 248 nm utilizando máscara de fase (VASIL'EV *et al*, 2005; VENUGOPALAN *et al*, 2010).

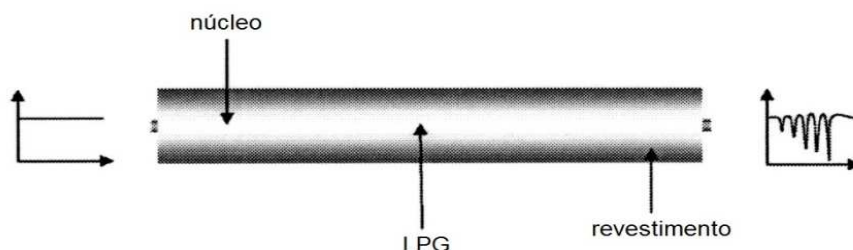


Figura 23: Principais elementos de uma rede de período longo (LPG) e seu perfil espectral característico, adaptado de (VENUGOPALAN *et al*, 2010).

2.6.2.7 Termometria Baseada em Redes de Bragg (FBG)

Este tipo de tecnologia de sensoriamento se baseia na reflexão de Fresnel como premissa principal para a realização das medições.

As redes de Bragg (FBGs) são inscritas no núcleo de uma fibra ótica monomodo fotossensível. Elas nada mais são do que variações periódicas do índice de refração no núcleo da fibra ótica. Esta modulação afeta a resposta espectral da luz incidente, de acordo com a Figura 24.

As FBGs estão situadas na faixa do espectro do infravermelho e compreendidas entre 1510 nm e 1590 nm. O princípio ótico associado às FBGs utiliza uma fonte de luz de banda larga que injeta luz em uma fibra ótica monomodo. Por ocasião da propagação da luz no núcleo da fibra ótica, ao perceber uma diferença entre o índice de refração da FBG e o restante do núcleo, reflete uma parcela da luz de volta correspondente a um determinado comprimento de onda, sendo que o restante da luz é refratada e transmitida. Este comprimento de onda refletido é chamado de comprimento de onda de Bragg (λ_b), sendo determinado pela seguinte equação (21) (VENUGOPALAN *et al*, 2010).

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda \quad (21)$$

onde,

n_{eff} = índice de refração efetivo da rede no núcleo da fibra;

Λ = período ou intervalo da rede FBG.

Medições de temperatura e deformação podem ser realizadas com as FBGs, visto que se pode associar uma relação de causa e efeito entre as variações de temperatura e deformação nas fibras óticas e as alterações para mais ou para menos no período ou intervalo da rede Λ . Esta alteração em Λ impacta diretamente no comprimento de onda refletido de Bragg, conforme apresentado na Figura 24.

Pelo exposto anteriormente, o intervalo da rede Λ pode ser alterado de forma crescente ou decrescente em função das variações térmicas ΔT ou dos

estados de deformação (ε) que uma fibra ótica venha a ser submetida. Estes deslocamentos relativos dos comprimentos de onda de Bragg $\Delta\lambda_b/\lambda_b$, referentes às variações de temperatura ou deformação, podem ser calculados conforme equação (22).

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = C_d\varepsilon + C_T\Delta T \quad (22)$$

onde,

λ_b = comprimento de onda de Bragg;

C_d = coeficiente de deformação;

C_T = coeficiente de temperatura.

Esta tecnologia se destaca atualmente por permitir a realização de sensoriamento quase-distribuído, em que é possível multiplexar uma grande variedade de sensores. Desta forma, diferentes grandezas podem ser medidas em locais distintos sem sobreposição dos seus sinais óticos.

A fim de aprimorar a exatidão das medições realizadas com as FBGs, pode-se utilizar um analisador de espectro ótico (OSA) de banda estreita de reflexão, que permite a realização de leituras simultâneas de temperatura e deformação nas fibras óticas.

Pela versatilidade e perspectivas promissoras, a tecnologia de sensoriamento por redes de Bragg foi escolhida para ser a base conceitual desta tese, sendo que nos próximos capítulos serão aprofundados os temas relacionados com as redes de Bragg para medições de altas temperaturas (OTHONOS, 1997; GRATTAN, 2000; VASIL'EV *et al*, 2005).

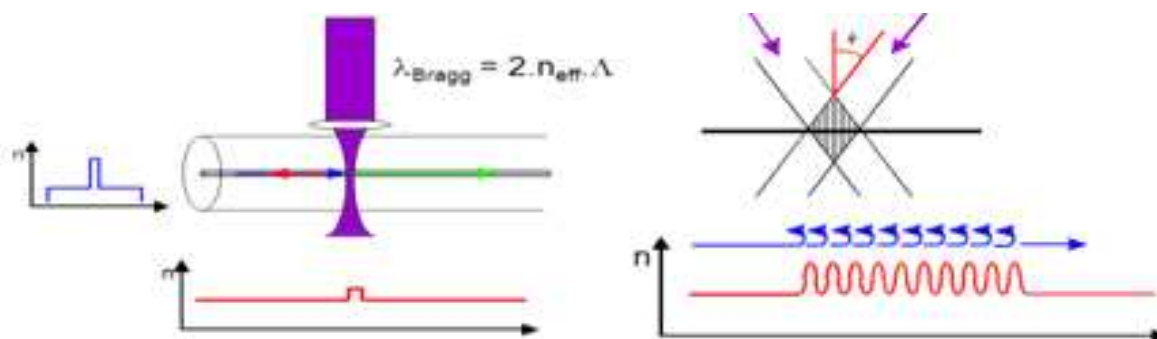


Figura 24: Representação esquemática da fabricação de uma rede de Bragg, adaptado de (FOKINE, 2009).