

Análise da eficiência da
CHAMINÉ SOLAR
no contexto climático do Distrito Federal

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - FAU
Programa de Pesquisa e Pós Graduação - PPG
Mestrado em Arquitetura e Urbanismo

Análise da eficiência da

C h a m i n é S o l a r

no contexto climático do Distrito Federal

Ana Carolina Cordeiro Correia Lima

Brasília, março de 2014

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - FAU
Programa de Pesquisa e Pós Graduação - PPG
Mestrado em Arquitetura e Urbanismo

Análise da eficiência da

Chaminé Solar

no contexto climático do Distrito Federal

Ana Carolina Cordeiro Correia Lima

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Marta Adriana Bustos Romero

Dissertação apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de mestre.

Brasília, março de 2014

Termo de Aprovação

Ana Carolina Cordeiro Correia Lima

Análise da eficiência da

Chaminé Solar

no contexto climático do Distrito Federal

Dissertação apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito para a obtenção do título de mestre.

Orientadora Prof^a. Dr^a. Marta Adriana Bustos Romero

Prof. Dr. Armando Caldeira Pires

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva

Brasília, março de 2014

RESUMO

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento social e o crescimento econômico do país. O desenvolvimento sustentável das cidades possui relação direta com o consumo per capita de energia. O Brasil possui 85% de sua matriz energética limpa, sendo aproximadamente 71% de geração hidrelétrica. No entanto, devido ao alto consumo do país, a tendência é o crescimento da demanda por mais energia. A produção de energia de forma insustentável gera emissão de gás carbônico e contribui para o efeito estufa. Este estudo aborda os problemas relacionados ao desenvolvimento de uma matriz energética totalmente limpa no Brasil, que funcione de maneira a complementar a fonte hidrelétrica com outros tipos de centrais locais, de forma a abastecer regiões menores. Inicialmente, uma análise crítica do setor elétrico brasileiro é feita para contribuir com o estudo de novas tecnologias modernas e limpas para o país. Uma das alternativas de produção de energia sustentável com facilidade de implantação em regiões tropicais é a Chaminé Solar. A análise da eficiência da tecnologia é realizada para o Distrito Federal (DF), capital do país e polo atrativo de novos investimentos. Há a descrição da nova tecnologia, com a apresentação dos dados de seu funcionamento. Em seguida, é desenvolvida uma análise da fonte termossolar da Chaminé Solar em comparação com outras fontes existentes. O resultado é apresentado em forma de tabelas informativas e comparativas. Assim, são apresentados dados que podem influenciar na implantação desta tecnologia, como características urbanas e climáticas do Brasil, bem como as do DF. O clima é o aspecto mais estudado, por isso são analisados dados e mapas de quantidade de radiação solar incidente, umidade e precipitação. Para o DF ainda, há gráficos de dados climatológicos coletados ao longo de um ano no site do INMET, tabelas de consumo de energia para cada região administrativa e o cálculo estimado de potência final de saída para uma central na região. A análise da eficiência abrange o estudo de mapas e dados digitais de uso do solo, áreas urbanas desocupadas, zoneamento, áreas de expansão territorial e densidade demográfica para a capital federal, de modo a estimar algumas áreas possíveis de implantação da tecnologia e suas vantagens e desvantagens. Ao final, é possível concluir que o funcionamento concomitante com as outras fontes existentes seria viável a longo prazo.

SUMÁRIO

Introdução	1
Justificativa do Tema	7
Objetivos e Procedimentos Metodológicos	8
1 A Matriz Energética Brasileira	11
1.1 As Fontes de Energia Brasileiras	12
1.2 A Regulação do Setor Energético Brasileiro	23
2 O Setor Elétrico no Distrito Federal	28
2.1 Energia Elétrica no DF	29
3 A Chaminé Solar	40
3.1 Antecedentes da Chaminé Solar	41
3.2 Aspectos Construtivos	51
3.3 Critérios de Implantação das Chaminés Solares	62
3.4 Custos	65
3.5 Chaminés Solares X Centrais Termossolares	68
3.6 Chaminés Solares X Outras Fontes	71
4 A Eficiência da Chaminé Solar no contexto climático do Distrito Federal	75
4.1 Fatores regionais que influenciam a implantação	76
4.2 O Distrito Federal	93
4.2.1 A Capital Federal e suas RA's	93
4.2.2 A População e a Economia	97
4.2.3 Paisagem, Geografia e Clima	99
4.2.4 Análise dos Locais de Implantação de Chaminés Solares no DF	103
Conclusões	116
A Chaminé Solar como alternativa para regiões do Distrito Federal	116
Anexos	126

Ao longo da história os países se desenvolveram com alto crescimento demográfico e uso intensivo de energia gerada por combustíveis fósseis. Como consequência, apresentam uma série de problemas e desafios, dentre eles o alto custo para a geração da energia, a poluição do ar, o aquecimento global, os riscos de segurança, a redução de recursos naturais e as desigualdades sociais e regionais.

O problema ambiental se intensificou com o aumento do preço do petróleo em 1973. O custo do produto aumentou cinco vezes, levando o mundo a uma crise financeira e assim, provocando reflexões sobre a organização social e urbana do século XX.

Os padrões atuais de desenvolvimento urbano seguiram o mesmo modelo, o que gera cada vez mais emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento de energia a longo prazo. Nesse sentido, a crise energética gerada pela demanda do homem, sua cultura e economia levam a insustentabilidade das fontes e tendências atuais de uso da energia. Nesse sentido, no mundo moderno a energia elétrica possui grande importância para a humanidade, seu consumo é um dos indicadores de desenvolvimento da população mundial.

A produção de energia é limitada e o planeta dá sinais de que, em breve, esse recurso não estará mais disponível na quantidade necessária. Geller (2003) afirma que caso se mantenham as atuais políticas e tendências energéticas, o uso global de energia tende a dobrar os níveis de 1990 até 2050.

Estima-se que a maior parcela desse crescimento ocorra em países em desenvolvimento, como a China, hoje um dos maiores poluidores mundiais. Isso devido ao seu grande crescimento demográfico e aos baixos níveis de políticas sustentáveis.

Segundo Geller (2003), o uso mundial de energia aumentou vinte vezes desde 1850, dez vezes desde 1900 e mais de quatro vezes desde 1950. Este aumento ocorreu principalmente devido à industrialização e proporcionou a melhoria da qualidade de vida a uma parcela da população mundial.

No entanto, as fontes de energia tradicionaisⁱ utilizadas no século XIX sofreram uma mudança nos últimos 150 anos. Segundo Grubler (1998) apud Geller (2003), a produção e o uso do carvão se expandiu no final do século XIX.

ⁱ A maior parte da energia consumida no século XIX era em forma de biomassa - lenha, carvão e resíduos agrícolas- também conhecidos como fontes tradicionais de energia (Geller, 2003, pg. 16).

Por volta de 1890, o carvão era a principal fonte de energia mundial. Já em meados do século XX, a produção e o uso do petróleo ganharam força. Além disso, o uso do gás natural e a energia nuclear cresceram nos últimos 25 anos. “O mundo já passou por outras revoluções energéticas” (GRUBLER,1998 apud Geller 2003, pg. 16).

Atualmente, segundo Neves (2005), os combustíveis fósseis correspondem a 80% do fornecimento global de energia. As fontes de energia sustentáveis respondem somente por 14%. Sendo que a maior parte delas se faz em forma de fontes tradicionais de energia. Somente 4,5% do fornecimento global total de energia se faz por modernas fontes de energia renováveis - hidráulica, eólica, solar, bioenergia, termossolar, energia das marés, entre outras. Nesse sentido Geller (2003) afirma:

“A continuidade do consumo cada vez maior de combustíveis fósseis causará muitos danos ao meio ambiente, um risco sem precedentes de mudança climática, além da rápida e crítica depleção dos recursos naturais” (GELLER, 2003, pg. 15).

Outras formas de produção de energia elétrica e combustíveis suscitam a atenção do mercado, podendo tornar-se competitivas, já que a tendência é de manter-se a evolução atual dos preços do petróleo. Além disso, certas formas de energia aparentam ser menos poluentes, visto que a demanda sustentável tende a aumentar, especialmente nos países desenvolvidos.

Segundo Neves (2005), as tecnologias de produção de energia limpa modernas, aliadas com o avanço tecnológico, permitem que o homem utilize-se cada vez mais dos recursos advindos da tecnologia em prol do desenvolvimento da energia sustentável. Nessa linha Goldemberg (2006) diz o seguinte:

“É preciso mudar esses padrões estimulando as energias renováveis, e, nesse sentido, o Brasil apresenta uma condição bastante favorável em relação ao resto do mundo” (GOLDEMBERG, 2006, pg. 01).

Em 1970 iniciaram-se debates sobre as mudanças climáticas que se caracterizaram por uma visão pessimista sobre o futuro da civilização. Tais discussões criticavam a forma como a população se desenvolve, cresce e se organiza. Assim teve origem o conceito de desenvolvimento sustentável formulado pela Comissão Brundtland.

O desenvolvimento sustentável apresenta uma preocupação com o meio ambiente e reflete nos meios de produção da arquitetura e do urbanismo, bem como na adaptação de projetos existentes a um novo modo de se construir.

Segundo Romero (2000) o planejamento de uso e ocupação do solo é uma tarefa complexa, uma vez que é um processo de gestão, bem como de tomada de decisão. Ele se manifesta através de práticas de transformação urbana dos ambientes natural e construído.

A autora afirma que a prática do desenho urbano tem se dado sem levar em conta os impactos que provocam no ambiente, repercutindo não só no desequilíbrio deste meio ambiente como também no conforto e salubridade das populações urbanas. Dessa forma, os novos projetos devem aproveitar o potencial das energias renováveis para se adaptarem tanto ao ambiente quanto à estrutura das cidades.

Desde 2005, por força da Lei 10.847/04, o governo brasileiro publica o Balanço Energético Nacional (BEN), documento que divulga a contabilidade da oferta e consumo de energia no país anualmente. Lentamente ocorrem avanços no tratamento e entendimento dos problemas ambientais Brasileiros.

Em 2003 energias renováveis representavam 41,3% do consumo total no Brasil, ao passo que no mundo eram apenas 14,4%. Segundo Romero (2001) desde 1970, a tendência é o pensar na prática de uma arquitetura solar, que trabalhe de forma a reduzir a dependência energética mundial de combustíveis advindos de fontes não-renováveis. Ou seja, a prática de princípios sustentáveis nos setores arquitetônico, urbano, bem como energético. Assim, a autora aponta:

“Abrangente e interdisciplinar, a sustentabilidade transcende as diferentes dimensões participantes da ocupação urbana e deve ser entendida como um processo e não apenas como um objetivo final ou como equilíbrio limitado à dimensão ecológica” (ROMERO, 2006, pg 02).

Para Leff (2008), o desenvolvimento da energia solar no mundo apresenta-se como uma das mais importantes e promissoras tecnologias para geração complementar de energia limpa. Associado com o rápido crescimento demográfico das cidades contemporâneas, traz a tona discussões sobre a sustentabilidade ambiental e urbana, ligadas à busca pela qualidade de vida no mundo moderno.

O montante de radiação global anual em qualquer região do Brasil é maior do que na maioria dos países europeus como Alemanha, França e Espanhaⁱⁱ, onde os projetos para aproveitar os recursos solares são muito difundidos, alguns com incentivos do governo.

ⁱⁱ Quantidade de radiação solar: Brasil (1500-2500kWh/m²), Alemanha (900-1250 kWh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850kWh/m²).

Nesse contexto, a busca de formas alternativas de geração de energia é tema presente nas discussões do governo brasileiro. Assim, o uso de tecnologia sustentável para complementação da energia hidrelétrica no país se faz presente no planejamento urbano e sustentável no país.

Uma vez que cada território possui características intrínsecas como clima, geografia e demandas diferenciadas, os valores obtidos precisam ser ordenados com ponderação de variáveis para cada região. A energia solar aparece como uma das alternativas para regiões tropicais, com abundância de incidência de radiação solar.

O trabalho a seguir apresenta tecnologia de uso ativo da energia solar. Seus elementos essenciais são utilizados pelo homem há muito tempo, pois **estufas** ajudam a cultivar alimentos, o **efeito chaminé** auxilia na ventilação natural dos edifícios e **moinhos de vento** bombeiam água e moem alimentos.

Assim, a Chaminé Solar é o tema do presente estudo, o qual visa a análise da eficiência da tecnologia no clima e território do Distrito Federal.

Para Schlaich (2002), a Usina Chaminé Solar, como a conhecemos hoje, possui referência inicial na construção civil, pois chaminés sempre foram utilizadas para remover a fumaça de lareiras e fornos.

Em seguida, o termo foi utilizado para descrever o tipo de construção que utiliza tubos ou aberturas para promover a ventilação natural nos edifícios por meio do efeito chaminé: o ar quente tende a subir enquanto o ar frio tende a descer.

Atualmente, o termo “chaminé solar” se refere à geração de energia solar através de **Usinas Chaminés Solares (SCPP - Solar Chimney Power Plants)** (**Figura 1**), utilizando o mesmo efeito chaminé.

Assim, para evitar desentendimentos no uso do termo, a empresa australiana *EnviroMission* denominou as SCPPs de Torres Solares. No entanto, o termo utilizado ainda pode ser confundido com uma das mais difundidas tecnologias de produção de energia solar, a Torre de Concentradores Solares (CSP) por Heliostatos (**Figura 2**).

Por fim, há também a denominação Torre Solar em Corrente Ascendente (*Solar Updraft Tower*) e o termo mais recente, segundo Bonelle (2012), Reatores Meteorológicos (*Meteorological Reactors*).

As Chaminés Solaresⁱⁱⁱ possuem variadas formas de denominação para determinação do mesmo tipo de tecnologia. Logo, o termo utilizado neste trabalho foi o original, difundido por Schlaich (1995), Usinas de Chaminés Solares (SCPP), devido ao seu conceito ser consolidado no meio acadêmico.



Figura 1. Usinas Chaminés Solares (Schlaich, 1995, pg 07).



Figura 2. Torre de Concentradores Solares por Heliostatos.(Enviromission, 2012)

Atualmente há uma variedade de tecnologias existentes que utilizam a energia solar para produção de energia limpa. Segundo Bernardes (2010), de forma simplificada, estas podem ser divididas em duas categorias: diretas e indiretas. A primeira pode utilizar a energia solar diretamente ou transformá-la uma vez para em seguida utilizá-la em outros lugares. Já a segunda envolve mais de uma transformação para se chegar a uma forma utilizável de energia elétrica.

ⁱⁱⁱ Sua descrição foi detalhada pela Schlaich Bergermann e Parceiros (empresa pública alemã) em 1982. A empresa estuda a tecnologia há mais de vinte anos, devido à iniciativa do professor e Doutor da Universidade de Stuttgart, o engenheiro alemão Dr. Jörg Schlaich (Schlaich, 1995).

A Usina Chaminé Solar gera energia de forma indireta. Em resumo, converte energia solar térmica em energia elétrica, fazendo uso de um fenômeno natural: o aquecimento da superfície da terra, e conseqüentemente, o aquecimento do ar adjacente a ela pela radiação solar.

A vantagem deste tipo de tecnologia é a facilidade de armazenagem e distribuição da energia gerada, visto que ela pode ser interligada à rede existente. Além disso, a economia de combustível fóssil e a redução de emissão de gases do efeito estufa são exemplos dos benefícios trazidos pela adoção de sistema renovável simples, como o da Chaminé Solar.

O Brasil está particularmente bem situado para esse tipo de aplicação em razão da considerável disponibilidade de recurso energético solar. Nesse sentido, a tecnologia da Chaminé Solar se apresenta como uma das soluções viáveis para a questão da produção de energia poluente e será estudada nesta dissertação como possível tecnologia de complementação da energia hidrelétrica no Distrito Federal.

JUSTIFICATIVA DO TEMA

A extensão do território brasileiro permite que tecnologias de grande porte possam ser testadas e aplicadas no país, de forma a ocupar o território e abastecer diretamente as regiões, sem a necessidade da distribuição percorrer grandes distâncias. Já existem análises da possibilidade de aplicação das torres como forma de melhoria da qualidade de vida nas áreas rurais mais pobres ou pouco urbanizadas. Está é realidade presente no interior do Nordeste brasileiro.

Além disso é notável a capacidade que o Brasil possui para adoção de matriz energética 100% limpa. Isto se deve principalmente à grande disponibilidade de recursos naturais e ao desenvolvimento de fontes alternativas de produção de energia.

A proposta de análise da viabilidade do uso de Chaminés Solares em Brasília se justifica também pelo desenvolvimento atual na bibliografia de estudos aplicados de maneira específica ao Brasil, que descrevem se a tecnologia seria ou não alternativa para o país.

Assim, uma das premissas mais importantes deve ser a escolha do local de implantação de uma Chaminé Solar, pois ela deve ser instalada em zonas de grande irradiação solar. Além disso, ao contrário da energia eólica, esta tecnologia não necessita de intensidade ou velocidade específicas de vento.

Logo, a escolha do local de estudo foi feita devido a facilidade de aplicação dos dados na capital federal, região de clima seco, polo atrativo de novos investimentos, e exemplo de arquitetura e urbanismo modernos.

Dessa forma, tal escolha possui vinculação ao simbolismo que o desenvolvimento de novas tecnologias proporciona. O DF é centro atrativo, tecnológico e acadêmico, portanto, ponto de partida de vários estudos relacionados à sustentabilidade e ao urbanismo.

O estudo de viabilidade da tecnologia da Chaminé Solar no contexto climático do Distrito Federal também se justifica por este local atender a um requisito essencial da tecnologia: a grande quantidade de radiação solar incidente^{iv}.

^{iv} O Distrito Federal, situado na região Centro-Oeste, possui altos índices de insolação anuais, de 2400 a 2600 horas/ano (INMET, 2011).

OBJETIVOS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo tem o objetivo de contribuir para a introdução de alternativas limpas de geração de energia no Distrito Federal, considerando seu contexto climático e suas características urbanas.

No intuito de atingir tal objetivo, com metodologia descritiva analítica, propõe-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Conhecer e analisar a matriz energética brasileira;
2. Identificar e avaliar as fontes de energia que abastecem o Distrito Federal;
3. Conhecer a tecnologia da Chaminé Solar;
4. Propor possíveis áreas de implantação da tecnologia das Chaminés Solares no clima do Distrito Federal.

Para conhecer e analisar a matriz energética brasileira - primeiro objetivo específico - foram apresentadas as fontes de energia que constituem a matriz energética brasileira de acordo com o BEN (2012). Em seguida foram analisadas cada uma das principais fontes de acordo com a classificação de fontes não renováveis como petróleo, gás natural, carvão mineral, minério de urânio, e renováveis, solar, eólica, hidrelétrica, biomassa. Foi descrita sua participação na composição da matriz energética brasileira e seu funcionamento. Ao final a fonte hidrelétrica foi detalhada com maior aprofundamento, visto que constitui a maior parte da matriz energética atualmente. Além disso, para complementar o estudo foram apresentadas as formas de regulação da energia hidrelétrica no país. A cadeia elétrica foi apresentada, logo foi descrito o processo de geração, distribuição e transmissão de energia, sua origem e como ele funciona no Brasil.

Já para identificar e avaliar as fontes de energia que abastecem o Distrito Federal - segundo objetivo específico - foi apresentado o estudo da formação do setor elétrico no DF. O estudo abrange a construção de Brasília, o seu crescimento urbano, bem como a instituição dos órgãos e entidades do setor energético. Também foi descrito o balanço energético atual e suas fontes de energia. Foram destacadas a sua dependência com outras regiões, bem como detalhada a demanda e consumo por região administrativa.

Em seguida, a tarefa de conhecer a tecnologia da Chaminé Solar - terceiro objetivo específico - foi alcançada com a descrição do que é a tecnologia da Chaminé Solar. E assim, foi detalhada sua origem, seus aspectos construtivos e critérios de aplicação, projetos em andamento, bem como foram apresentadas quais as

vantagens e desvantagens em relação a outros tipos de tecnologias de produção de energia limpa. Foram desenvolvidos quadros comparativos com outros tipos de tecnologia e apresentadas fórmulas de cálculo da potência final de saída da Chaminé.

Finalmente, o objetivo específico de avaliar possíveis áreas de implantação da tecnologia das Chaminés Solares no clima do Distrito Federal foi atingido com o detalhamento de aspectos que possuem influencia direta na escolha do local de implantação de uma Chaminé Solar. Assim, foram estudadas diversas características da implantação da Chaminé: suas dimensões, a potência de saída, condições ambientais, temperatura, chuvas, bem como a radiação solar. Foram coletados, ainda, mapas e imagens de satélite apresentados de forma a retratar os critérios em questão, de forma a analisar qual região possui mais vantagens de implantação da tecnologia.

Em seguida foram apresentados dados da Capital Federal e de suas Regiões Administrativas, como sua população, economia, geografia, clima e recursos energéticos com base no banco de dados do IBGE (2013), bem como do INMET (2011). Também foram coletados dados climáticos no INMET ao longo de um ano (de março de 2012 a março de 2013) e apresentados em forma de gráfico. Nesse contexto, a tese de Strobel (2012) aparece como base para o estudo de cálculo de potencial energético de uma Chaminé no Brasil. Esse estudo foi complementado com a análise matemática da potência de saída elétrica possível para uma chaminé nessa região através dos estudos de Schlaich (1995). Esta fórmula relaciona valores climáticos de determinada região com fatores de potência, custo e dimensões estimadas das Chaminé Solar. Assim, por meio de cálculos aplicados ao DF, pode-se chegar a resultado final esperado de potência.

Ao final, mapas do DF foram interpretados e analisados a partir das premissas de aplicação da Chaminé Solar. Este estudo resultou na delimitação de três áreas urbanas com grande pontencial de instalação da tecnologia. Foram utilizados mapas de uso do solo, expansão urbana, zoneamento, radiação solar, temperatura, pluviometria, densidade demográfica, geomorfologia, declividade e planejamento urbano. Assim, foi possível descrever as vantagens e desvantagens de cada área apresentada e ao final concluir se seria possível o uso de Chaminés Solares no contexto climático do Distrito Federal.

Este trabalho está organizado em quatro capítulos. O primeiro trata da matriz energética brasileira, e foi dividido em dois subcapítulos que discorrem sobre as fontes de energia brasileiras e a regulação do setor energético brasileiro. Os principais autores tratados foram Goldemberg e Lucon (2006), Goldemberg (2010), Pereira et al.

(2006), Reis et al. (2005), Paletta et al. (2012), Vogt (2002), MME (2013), EPE (2012) e Portal Brasil (2010), BEN (2012) e Petrobrás (2013), Correia (2010), Goldemberg e Lucon (2006), e Golbemberg e Chu (2010).

Em seguida, o segundo capítulo aborda o estudo do setor elétrico do Distrito Federal com a descrição de como funciona a energia na região. Para tanto, foram analisados os relatórios da CEB (2013), do MME (2013), da Embaixada Verde (2013), bem como da ANEEL (2013).

Já o terceiro capítulo descreve a tecnologia das Chaminés Solares, e assim seus antecedentes, aspectos construtivos, critérios de aplicação, custos, além de comparações com outros tipos de tecnologia de centrais termossolares, bem como com outras fontes de energia (eólica, hídrica e termoelétrica). Os autores tratados neste capítulo foram Bernardes (2010), Dufour (2008), Schlaich (1990), (2002) e (2003), Neves (2005), Bernardes et al. (2003), Gannon e Von Backstrom (2000), Von Backstrom e Gannon (2004), Bonelle (2005), Ketlogetswe et al. (2008) e Shasha (2010).

Por fim, o quarto capítulo trata do estudo de viabilidade de uma Chaminé Solar no contexto climático do Distrito Federal e está dividido em dois subcapítulos.

O primeiro consiste nos fatores locais que influenciam sua implantação localizados espacialmente em mapas, bem como apresentados em tabelas de dados e gráficos climáticos. A partir disso é possível destacar alguns locais no território brasileiro que seriam mais propícios à implantação de Chaminés Solares. Também é feito o cálculo matemático da potência final de saída de uma central, com a base nas equações de Schlaich (1995) e assim comparada a potência com o consumo de regiões do Distrito Federal.

Já o segundo subcapítulo traz a descrição de dados gerais do DF, como população, economia, clima, geografia e recursos energéticos disponíveis, além de mapas e imagens de satélite com dados de clima, uso do solo, zoneamento, expansão urbana, vegetação, relevo, hidrografia. Dessa forma é feita análise de como a tecnologia seria aplicada ao nosso contexto climático e urbano, com a indicação de alguns locais em que seria possível implementar uma central no DF a longo prazo.

Os autores utilizados foram Neves (2005), Romero (2000), Martins et al (2008), bem como dados do INMET (2011), IBGE (2013), Pereira et al. (2006), Strobel (2012), além de dados, imagens e mapas do PDOT, SolarGis, Terracap, Codeplan, e da Administração Regional de Brasília.

1 A M A T R I Z E N E R G É T I C A B R A S I L E I R A

1.1 AS FONTES DE ENERGIA BRASILEIRAS

Aqui são apresentadas as principais fontes energéticas existentes no Brasil. Cada uma delas é analisada e seu impacto ambiental apresentado. Dessa forma, é descrita qual a percentagem da matriz energética brasileira^v é proveniente de fontes renováveis, e dentre elas qual o peso da energia hidrelétrica para o país. Assim, é possível perceber como se deu a formação da matriz energética brasileira desde 1960 até hoje. São ressaltadas as décadas de maior crescimento do parque hidrelétrico do país, bem como os impactos ambientais e sociais desse modelo no urbano. Os principais autores estudados são Goldemberg e Lucon (2006), Goldemberg (2010), Pereira et al. (2006), Reis et al. (2005), Paletta et al. (2012), Vogt (2002), MME (2013), EPE (2012) e Portal Brasil (2010), BEN (2012) e Petrobrás (2013).

Os autores afirmam que atualmente as principais fontes energéticas brasileiras são o petróleo, o gás natural, o carvão mineral, as energias hidráulica, solar, eólica e nuclear, bem como a biomassa (bio-diesel e produtos da cana).

O primeiro recurso energético a ser analisado no trabalho é o petróleo. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2012), o consumo de petróleo no Brasil é essencialmente determinado pela demanda interna de diesel, uma vez que praticamente todo o transporte público de passageiros e de carga é baseado na utilização de veículos a diesel. A CNI afirma que esse fator é potencializado pelas dimensões continentais do país (**Gráfico 01**).

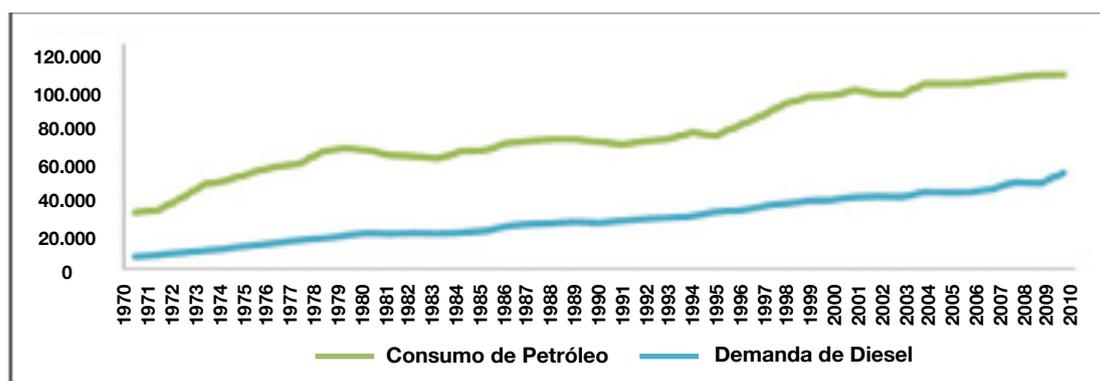


Gráfico 01. Consumo de petróleo e demanda de diesel no Brasil (PNE, 2007).

^v Segundo Reis et al. (2005) a matriz energética representa de forma quantitativa, ao longo do tempo, todas as relações entre as fontes energéticas disponíveis e a cadeia energética. Assim, abrange desde a utilização dos recursos naturais até os usos finais da energia.

Segundo Reis et al. (2005) o setor do petróleo no Brasil é dominado pela Petrobrás, empresa estatal, criada em 1953. Os autores afirmam que a empresa produz cerca de 249 mil barris de petróleo por dia, com 17 poços produtores, sendo 6 deles na Bacia de Santos e 11 na Bacia de Campos. Segundo a Petrobrás (2013) o país atingiu a auto-suficiência da produção em 2006, quando a produção de petróleo equiparou-se ao volume de derivados consumidos na época. No entanto, entre 2007 e 2012, a demanda por derivados cresceu 4,9% no Brasil, contra um incremento de 3,4% na produção de petróleo.

Reis et al. (2005) descrevem que a maior parte do petróleo produzido a partir de 2008 vem das plataformas marítimas da Bacia dos Campos, Rio de Janeiro. E que cada vez mais, essa produção é obtida sob 2.500 m de lâmina d'água.

A Petrobrás (2013) afirma que para conseguir descobrir essas reservas e operar com eficiência em águas ultraprofundas, desenvolveu tecnologia própria e atua em parceria com universidades e centros de pesquisa.

Dessa forma, ainda que no ano de 2013 o país tenha importado cerca de 245 mil barris por dia de diesel e gasolina da Venezuela, o Plano de Negócios e Gestão 2013-2017 da Petrobrás pretende superar a marca de 1 milhão de barris por dia em 2017 com a implantação de 25 novas unidades de produção.

Segundo o BEN (2012) 38,6% da matriz energética brasileira é formada por recursos não renováveis provenientes do petróleo e seus derivados. Para Vogt (2002) o petróleo traz grandes riscos ao meio ambiente, já que os processos de extração, transporte, refino, e até o consumo produzem gases poluentes da atmosfera. Contudo, o autor afirma que os piores acidentes ocorrem durante o transporte devido a possibilidade de vazamento em grande escala de oleodutos e navio petroleiros.

No Brasil, Vogt (2002) afirma que os maiores danos aconteceram em oleodutos da Petrobrás, na Baía de Guanabara e no Paraná. Segundo a Petrobrás (2013) para enfrentar os riscos ambientais a própria empresa criou o Programa Pégaso, em que várias universidades brasileiras desenvolvem pesquisas para criar formas eficientes para a limpeza de áreas degradadas.

Para Vogt (2002) evitar acidentes não se resume somente à manutenção e fiscalização. Sempre haverá um risco contínuo com esses tanques enormes. O autor afirma que o problema é a matriz energética. Nesse sentido, o Greenpeace defende a substituição e a eliminação gradual dos combustíveis fósseis por fontes renováveis alternativas como a energia eólica, solar e a energia das marés.

Segundo Reis et al. (2005) o gás natural possui relação com o meio ambiente parecida com a do petróleo, pois é um recurso não renovável. No entanto, representa somente 10,1% da matriz energética. O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves encontrados em acúmulo nas rochas porosas do subsolo, frequentemente acompanhado por petróleo (gás associado) ou constituindo um reservatório (gás não associado).

Segundo Pereira et al. (2006) o Metano (CH₄) é o seu maior constituinte, gás que se dissipa rapidamente devido ao sua densidade inferior que a do ar. Dessa forma, a queima do gás natural, apesar de menos poluente em termos quantitativos que o carvão ou a biomassa, ainda traz ao meio ambiente o gás metano, um dos causadores do efeito estufa.

No Brasil, Reis et al. (2005), afirmam que as bacias sedimentares de gás natural possuem uma extensão de aproximada de 4,4 milhões de km², sendo que 18,2% são localizadas no mar. A Petrobrás (2013) coloca que 70% das reservas encontram-se na forma de gás associado, e 40% se localizam principalmente na Bacia de Campos no Rio de Janeiro.

Segundo o BEN (2012), a produção bruta no país em 2012 foi de 70,8 milhões de metros cúbicos por dia. Para Reis et al. (2005), o consumo de gás natural no Brasil provém das jazidas naturais do país. Além disso, da importação da Bolívia e da Argentina.

Os autores afirmam que sua aplicação residencial e comercial ocorre principalmente na cocção de alimentos e aquecimento de água. Já na indústria ele é utilizado como combustível para fornecimento de calor, podendo ser utilizado na geração de força motriz e eletricidade. Dessa forma, serve como substituto do óleo diesel, da lenha e do carvão mineral.

Segundo Reis et al. (2005) dentre os combustíveis fósseis que o gás natural pode substituir o carvão mineral é um dos menos utilizados no país, devido a má qualidade dos carvões encontrados nas jazidas do Brasil.

De acordo com Reis et al. (2005), o carvão mineral é um combustível fóssil formado há milhões de anos com a decomposição da matéria orgânica de vegetais em bacias sedimentares. Esse material se submetido a elevada pressão e temperatura em contato com o ar é então transformado em um produto sólido. Quanto maiores a pressão e temperatura, e quanto mais tempo durar o processo, maior será a quantidade de carbono presente no produto e menor a quantidade de elementos voláteis como o oxigênio.

No Brasil há ocorrência de reservas de carvão em vários estados. No entanto, as maiores e mais exploradas se situam na região Sul do país. O estado do Rio Grande do Sul possui 88% do total de reservas do Brasil, sendo que Candiota é a principal jazida carbonífera já medida.

Para Reis et al. (2005) embora utilizado em outros países em larga escala a produção brasileira de carvão mineral têm evoluído a uma taxa muito pequena e de forma oscilante. O material de baixa ou média qualidade não permite o transporte, logo impede o beneficiamento. Assim é usado, na maioria dos casos, na sua forma bruta.

Além disso, o processo de fabricação emite gases nocivos ao meio ambiente, como os gases do efeito estufa, o que inibe seu uso, devido as exigências com relação ao controle de emissão desses gases. Para os autores a posição do Brasil como produtor mundial de carvão mineral é insignificante, na marca de 0,2%, e 5,6% de participação da matriz energética brasileira, segundo o BEN (2012).

Quanto a energia nuclear, o BEN (2012) define que o urânio corresponde a 1,5% do total dos recursos não renováveis presentes na matriz energética. Segundo Reis et al. (2005) o minério de urânio é toda concentração natural de minerais em que o urânio ocorre em proporções e condições que permitam sua exploração econômica.

Os autores afirmam que o que é usado nos reatores nucleares é sua propriedade de se fissionar e não a radioatividade. Dessa forma, a quebra do núcleo doa átomos de urânio libera grande quantidade de energia quando atingido por um nêutron.

Segundo Pereira et al. (2006), a energia nuclear pode ser citada como fonte limpa por não provocar a emissão de gases do efeito estufa. Contudo a energia nuclear não é bem aceita pela sociedade civil, pois a radioatividade é fator de risco para os seres humanos e o meio ambiente. Assim, o tempo necessário para que a atividade radioativa dos elementos seja reduzida pela metade da atividade inicial (meia-vida) é alto, o que aumenta os riscos associados ao problema do armazenamento dos rejeitos radioativos gerados pela produção de energia.

No Brasil, Reis et al (2005) afirmam que 79% das reservas estão localizadas na Bahia e no Ceará. No entanto, o programa nuclear se encontra cada vez mais em desuso, dado os problemas ambientais que podem ser causados com danos nas usinas, como vazamento de material radioativo.

Dessa forma, o consumo baixo presente na matriz energética indica somente o mínimo destinado a suprir o consumo nas usinas Angra I (650 MW) e Angra II (1300 MW), em Angra dos Reis.

Já quanto às energias renováveis o Balanço Energético de 2012 apresenta na matriz energética 87% provenientes de fontes limpas.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, Pereira et al (2006) afirmam que a energia solar, ainda incipiente no país, representa um investimento de longo prazo. Segundo Paletta et al. (2012) o desenvolvimento atual da tecnologia permite que os sistemas fotovoltaicos utilizem o recursos solar de forma limpa.

Segundo Goldemberg (2010) células fotovoltaicas convertem a energia do sol em eletricidade pois os fótons absorvidos pela célula deslocam elétrons livres do material semi-condutor. Assim, há o desequilíbrio de cargas, o que cria uma diferença de potencial dentro da célula. Esta, conectada em suas extremidades a um circuito, permite que a eletricidade flua. Dessa forma, o autor afirma que um módulo fotovoltaico geralmente é composto por painéis de células, cada uma com 1 a 10 cm de espessura e 1 a 2 W de potência.

Atualmente, a energia solar ainda não possui participação efetiva na da matriz energética brasileira, logo não aparece no BEN (2012). Para Paletta et al (2012), em relação às questões ambientais, a tecnologia solar fotovoltaica não gera qualquer tipo de efluentes sólidos, líquidos ou gasosos durante a produção de energia. Também não emite ruídos nem utiliza recursos naturais esgotáveis.

No entanto, os autores afirmam que há a emissão de poluentes e gastos energéticos durante o processo de fabricação dos módulos, além dos problemas ligados a reciclagem dos equipamentos após o término de sua vida útil. Nesse sentido, a indústria fotovoltaica utiliza gases tóxicos e explosivos, como cádmio, chumbo e selênio, além de líquidos corrosivos como cobre, níquel e prata na sua linha de produção.

Para Bardelin (2004) dentre as fontes renováveis de energia, a energia eólica é a que vem recebendo maior volume de investimentos do Governo Brasileiro, devido ao Programa de Incentivo às fontes Renováveis (PROINFA). Segundo o autor, o Brasil possui um potencial eólico de aproximadamente 143,5 GW, o que justifica e incentiva o crescimento da área. Dessa forma, a médio prazo, é possível que a energia eólica apareça em porcentagem relevante da matriz energética brasileira, atuando como fonte descentralizada, de forma a complementar a energia acoplada à rede elétrica.

No entanto, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro indica que nem todas as regiões do país podem receber a tecnologia, devido a falta de condição predeterminada do vento para a geração de energia, como a região Amazônica. Atualmente, segundo o BEN (2012), somente 0,5% da matriz energética brasileira provém da energia eólica (**Gráfico 02**).

O mesmo gráfico apresenta matriz energética que conta com a participação de 81,7% de energia hidráulica. Energia proveniente de 140 usinas em operação no Brasil, com perspectiva de aumento do uso dessa fonte.

Segundo o Portal Brasil (2010) pode-se dizer que, se comparada com a matriz energética mundial, composta por 14% de fontes renováveis no caso de países industrializados, até 6% entre as nações em desenvolvimento, o Brasil é um dos países com a matriz energética mais sustentável.

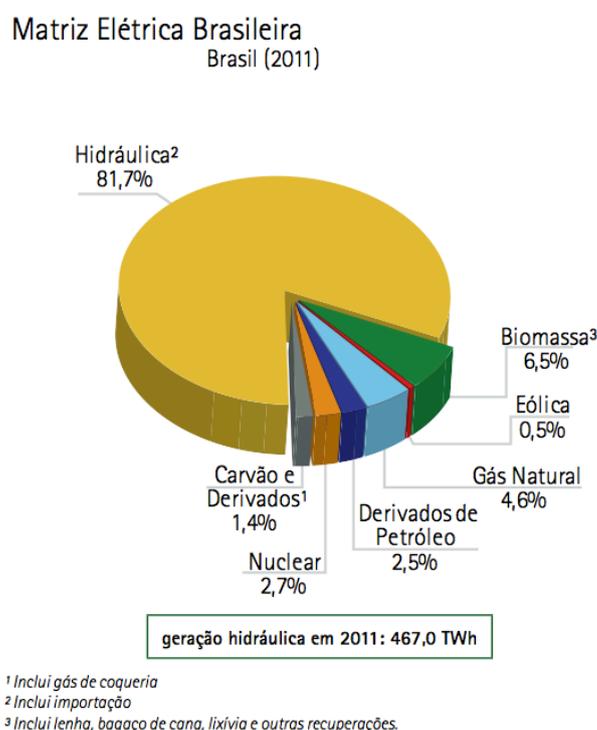


Gráfico 02. Fontes constituintes da matriz energética brasileira (BEN, 2012).

Para Goldemberg e Lucon (2006) o Brasil usa energia hidrelétrica desde o final do século XIX. No entanto, as décadas de 1960 e 1970 marcaram a fase de maior investimento na construção de grandes usinas. Os autores afirmam que devido a esses investimentos, o país possui hoje a maior hidrelétrica do mundo em geração de

energia, a usina de Itaipu, inaugurada em 1984 depois de um acordo binacional com o Paraguai.

Segundo os autores, Itaipu tem hoje potência instalada de 14.000 MW, com 20 unidades geradoras. Essa capacidade é suficiente para suprir cerca de 80% de toda a energia elétrica consumida no Paraguai além de 20% da demanda do sistema interligado brasileiro.

Segundo o MME (2013), seu reservatório tem o maior aproveitamento de energia com relação à área inundada. Ou seja, para a potência instalada de 14.000 MW, foram alagados 1 350 km². O órgão afirma que a usina mais potente no Brasil, depois de Itaipu, Tucuruí, tem capacidade instalada de 8.370 MW. No entanto a área inundada chega a 2.430 km². Nesse sentido, Itaipu é beneficiada por ser a última usina da Bacia do Rio Paraná classificada como a fio d'água, isto é, utiliza toda a água que chega ao reservatório, mantendo uma reserva mínima para garantir sua operacionalidade.

Nesse contexto, segundo Perereira et al. (2006), a fonte hidráulica, apesar de ser considerada uma fonte renovável e limpa, produz um impacto ambiental ainda não avaliado adequadamente, devido ao alagamento de grandes áreas cultiváveis^{vi}.

De acordo com o MME (2013), o impacto ambiental da construção da usina hidrelétrica de Itaipu foi devastador, pois quando houve o fechamento das eclusas da barragem, uma área de 1.500 km² de florestas e terras agriculturáveis foi inundada. A cachoeira de Sete Quedas, uma das formações naturais do planeta, desapareceu.

Dessa forma, semanas antes do preenchimento do reservatório foi realizada uma operação de salvamento dos animais, denominada Mymba kuera ("pega-bicho" em guarani). Equipes de voluntários conseguiram capturar mais de 4.500 bichos selvagens, entre macacos, lagartos, porcos-espinhos, roedores, aranhas e tartarugas. Esses animais foram levados para as regiões vizinhas protegidas da água.

O mesmo ocorreu com o impacto social causado pela usina. Segundo o MME (2013), durante a instalação da Itaipu, foi necessária a desapropriação de 42.444 pessoas. Destas 38.440 eram trabalhadores do campo, o que gerou inúmeros problemas sociais.

O órgão afirma que algumas dessas famílias viviam às margens do Rio Paraná e foram desalojadas, a fim de abrir caminho para a represa. Parte delas se refugiaram em Medianeira, cidade não muito longe da confluência dos rios Iguazu e Paraná.

^{vi} Estudos mostram que gases do efeito estufa, principalmente o Metano (CH₄), são emitidos para a atmosfera em consequência de processos de degradação anaeróbia da matéria orgânica que ocorrem em áreas alagadas (PEREIRA ET AL. 2006, pg. 12).

Outras famílias vieram, eventualmente, a serem membros de um dos maiores movimentos sociais do Brasil, o Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra.

Para o MME (2013), as usinas de Jirau e Santo Antônio, ainda em fase de construção, no Rio Madeira, utilizam a tecnologia de turbinas de bulbo, diminuindo um pouco o alagamento necessário e, conseqüentemente, os efeitos negativos como o deslocamento de populações locais, desapropriação de terras e o impacto ambiental.

Segundo Goldemberg e Lucon (2006) no país ainda existe potencial de cerca de 190.000 MW de energia hidrelétrica não utilizado, principalmente na região da Amazônia. Em 2011, houve a discussão sobre o projeto de construção da usina de Belo Monte, hoje em construção no rio Xingu, no estado do Pará.

Segundo o MME (2013), com capacidade de produção de 11 mil MW, Belo Monte entrará em operação em 2015. A previsão é de que abasteça 40% do consumo de energia residencial do país, com 4.571 MW de energia adicionados ao sistema elétrico brasileiro.

O órgão afirma que, com relação ao impacto sócio-ambiental, o projeto inicial se preocupou em diminuir em até 60% da área inundada. Isso a partir de mudança do regime de operação para fio d'água, o que permite um reservatório menor. No entanto, ainda assim, 516 km² de área da região indígena serão inundados, de forma a devastar áreas de fauna e flora locais.

Para o MME (2013), com o intuito de monitorar os impactos, o Brasil investiu no aperfeiçoamento das avaliações realizadas pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) antes da instalação de qualquer usina. Entretanto, Goldemberg e Lucon (2006) apontam:

“A pressão externa e a ânsia do governo em aprovar os projetos, considerados urgentes pelos modelos da EPE, frequentemente tornam os órgãos de licenciamento ambiental obstáculos ao desenvolvimento, impedindo a construção de usinas hidrelétricas e levando os leilões de energia a privilegiarem outras fontes.” (GOLDEMBERG E LUCON. 2006, pg. 06).

Goldemberg e Lucon (2006) afirmam que essa é uma visão distorcida da realidade, pois muitos empreendedores e setores governamentais têm a visão de que o licenciamento ambiental é uma mera formalidade. Além disso, para os autores, com frequência as obras começam antes de se iniciar o licenciamento ambiental nos órgãos competentes. Dessa forma esquecendo-se dos preceitos constitucionais e das leis em vigor no país.

Para os autores, os estudos de impacto ambiental são incompletos. Aspectos macroeconômicos, como as altas taxas de juros, levam o empreendedor a privilegiar projetos de construção mais rápida, o que ocasiona atraso na conclusão da obra pelo próprio interessado.

Segundo Goldemberg e Lucon (2006) o que se impõe é que os órgãos ambientais encontrem saídas para o complicado processo de licenciamento das usinas hidrelétricas - a vocação natural do país. Logo, os autores afirmam que economizar nessas medidas é o que mais contribui para atrasar a expansão do setor hidrelétrico. O que deveria ser feito era o incentivo a outras fontes de produção de energia, de forma a desafogar o setor de hidrelétricas.

Para Pereira et al. (2006) atualmente nada impede que o uso de tecnologias modernas e eficientes seja introduzido logo no início do processo de desenvolvimento, acelerando o uso de tecnologias eficientes, como a energia solar.

No entanto, percebe-se que, tratando das outras fontes que constituem a matriz energética, não há incentivo real. Além disso, segundo Goldemberg e Lucon (2006) a área de racionalização do uso de energia não tem recebido prioridade. Em um país em desenvolvimento como o Brasil, o consumo de energia per capita ainda é pequeno e não se poderia esperar que medidas de eficiência energética tivessem tanto impacto, já que é indispensável que o consumo de energia cresça para promover o desenvolvimento do país.

Para Goldemberg (2010), com a introdução da biomassa^{vii}, da energia nuclear e do gás natural a porcentagem da hidroeletricidade reduziu de 92% em 1995 para 83% em 2002. A geração de eletricidade com biomassa em 2002 provinha de 159 usinas, com uma capacidade instalada de 992 MW, ou 8% da energia elétrica de origem térmica do país. A grande maioria dessas usinas (com cerca de 952 MW) está localizada no Estado de São Paulo e usa bagaço de cana, um subproduto da produção de açúcar e álcool.

Com relação a biomassa, a utilização no Brasil é resultado de uma combinação de fatores, incluindo a disponibilidade de recursos e mão-de-obra baratas, rápida industrialização e urbanização e a experiência histórica com aplicações industriais dessa fonte de energia em grande escala.

Nesse sentido, para Reis et al. (2005) aproximadamente 75% do álcool produzido é proveniente do caldo de cana (com rendimento próximo de 85 litros por

^{vii} A biomassa se divide em resíduos vegetais e bagaço de cana.

tonelada de cana). Os restantes 25% têm origem no melaço resultante da produção de açúcar (rendimento próximo de 335 litros por tonelada de melaço).

Em 2004, Goldemberg e Lucon (2006) apontam que a produção total de bagaço ficou próxima de 110 milhões de toneladas, gerando um excedente de 8,2 milhões de toneladas para usos não-energéticos. Desta forma, os produtos energéticos resultantes da cana contribuíram com 13,5% da matriz energética brasileira de 2004.

Já a utilização da lenha no Brasil é significativa. Os autores afirmam que nas carvoarias, para produzir carvão vegetal, e na cocção de alimentos nas residências, o combustível é muito utilizado. Em 2004, o setor residencial consumiu cerca de 26 milhões de toneladas de lenha, equivalentes a 29% da produção. O consumo tem crescido nos últimos anos pelo aumento dos custos do seu substituto direto, o gás liquefeito de petróleo (GLP), vendido em botijões. Na produção de carvão vegetal foram consumidas cerca de 40 milhões de toneladas (44% da produção), em razão principalmente do forte crescimento da produção de ferro gusa e substituição do carvão mineral. Os restantes 17% representam consumos na agropecuária e demais setores da indústria. A lenha e o carvão vegetal representaram 13,2% da matriz de 2004, resultado 0,3% acima de 2003.

Dessa forma, Goldemberg e Lucon (2006) afirmam que construir usinas a carvão, uma fonte altamente poluente, tornou-se um bom negócio no país. Além das unidades já contratadas, a EPE habilitou 43 usinas a diesel e a óleo combustível para o próximo leilão, que ocorreu em outubro de 2006. Isso representa 4.070 MW, ou 20% da capacidade instalada total oferecida nesse leilão. Duas térmicas a carvão devem entrar no leilão com 1.192 MW, mesmo sendo problemática a qualidade do carvão nacional.

Segundo o Ministério de Minas Energia (2013), o volume total de etanol produzido em 2008 alcançou a marca dos 27 bilhões de litros, com um aumento de 17,9% se comparado ao período anterior. As estimativas oficiais são de que este número irá crescer para 37 bilhões de litros em 2015.

Para Goldemberg e Lucon (2006), o planejamento energético deve ser pensado de maneira diferente. Se o país seguir o modelo atual de produção de energia, a posição relativamente confortável que o país possui em sua matriz energética pode ser colocada em risco. Nesse sentido os autores afirmam:

“A produção e o consumo de energia são ambientalmente impactantes, mas os padrões atuais de consumo podem ser melhorados, estimulando o uso mais eficiente de energia e transição de fontes de energia fósseis para fontes renováveis. (GOLDEMBERG E LUCON, 2006, pg 01).

Os autores destacam que isso pode ser concretizado por meio de políticas e ações relativamente simples e muitas vezes economicamente atrativas.

Ao longo do capítulo percebe-se que há uma necessidade de se complementar o setor de hidrelétricas no Brasil, de forma a incentivar o estudo e implantação de outras fontes de produção de energia modernas e limpas no país.

A matriz energética brasileira demonstra que a participação de fontes alternativas ainda é pequena se comparada aos 81,7% de energia gerada pela fonte hidráulica. Assim, se apresenta no país essencialmente pelo uso da biomassa (6,5%) e da energia eólica (4,6%).

Ja a energia solar não aparece com destaque nesse contexto, devido a falta de políticas governamentais. No entanto, estudos relacionados ao tema são cada vez mais relevantes e atuais. Nesse sentido, a eficiência energética com a busca de fontes alternativas de energia interligadas é, sem dúvida, a maneira mais efetiva de ao mesmo tempo reduzir os custos da geração de energia, além dos impactos ambientais locais.

1.2 A REGULACÃO DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

O subcapítulo em questão aborda a regulação da energia no Brasil. O tema é tratado juntamente com as questões políticas de cada época analisada. Dessa forma, pode-se descrever cada um dos quatro modelos de regulação adotados no país, tradicional, desestatização parcial, modelo novo e o modelo novo modificado para o que temos hoje, e suas relações com o contexto político e social da época. Os autores em destaque são Reis et al. (2005), Correia (2010), Bardelin (2004), Goldemberg e Lucon (2006), e Golbemberg e Chu (2010).

A cadeia da energia elétrica pode ser representada, segundo Reis et al (2005), por blocos associados a etapas de produção, transporte e utilização. Dessa forma, o suprimento, considerado como a cadeia que abrange desde o processo de transformação da energia primária até a interface com o consumidor, está dividido em geração, transmissão e distribuição.

Os autores afirmam que a geração é o processo de produção de energia elétrica, por meio de diversas tecnologias e fontes primárias, como os recursos que compõe a matriz energética, citados no subcapítulo anterior. Já a transmissão é o transporte de blocos de energia a distâncias longas, através de linhas de transmissão. Logo, a distribuição está associada ao transporte da energia do ponto de chegada da transmissão ou subtransmissão até cada consumidor individualizado (residencial, industrial ou comercial).

Segundo Reis et al. (2005), a transmissão e distribuição podem estar ligadas pelos sistemas de subtransmissão. Dessa forma, próximas às áreas urbanizadas das cidades ou áreas rurais, nos centros de consumo de energia. Para os autores, é a partir destes pontos que se desenvolvem os sistemas de subtransmissão e distribuição.

Cada uma destas áreas têm características organizacionais, técnicas, econômicas e de inserção urbana específicas, cujos aspectos são regulados no Brasil, pelo Governo Federal. Nessa linha Reis et al. (2005) afirmam:

“A tecnologia de serviço, que usa como matéria prima a energia útil para fornecer um serviço energético, define os limites entre o sistema que fornece o serviço energético e o meio ambiente. Atualmente, os principais usos finais da eletricidade no mundo referem-se aos serviços de iluminação, força motriz, aquecimento, refrigeração, dentre outros que incluem os serviços eletrônicos de escritório e residenciais” (REIS ET AL., 2005, pg. 284).

Dessa forma, para Reis et al. (2005), a geração de energia elétrica compreende todo o processo de transformação de uma fonte primária de energia (renovável ou não renovável) em eletricidade e representa uma parte significativa dos impactos ambientais, socioeconômicos e culturais dos sistemas de energia elétrica. No Brasil a maior parte da energia elétrica produzida em centrais hidrelétricas percorre um longo caminho até o seu local de uso.

Segundo os autores, as centrais de geração convencionais encontram-se longe dos centros urbanos de consumo devido a sua própria natureza, como no caso das hidrelétricas citadas, que dependem de grandes desníveis de rios e necessidade de grandes áreas alagadas. Dessa forma, é possível afirmar que, devido a grande extensão territorial brasileira, o custo de transmissão da energia no país é alto.

Para Correia (2010), o início da geração se deu quando o país ainda era agrário. Em 1888, houve a construção da usina hidrelétrica de Marmelos, em Juiz de Fora, Minas Gerais. Em seguida, em 1899, com a chegada do grupo Canadense Light, que deteve o controle dos serviços de exploração da energia elétrica no território nacional, a produção de energia se intensificou. Logo, a Light foi nacionalizada pelo Governo brasileiro e a energia já existia no eixo Rio-São Paulo.

Anos depois, o modelo estabelecido pelo Governo brasileiro em 1940, foi o tradicional. Segundo Goldemberg e Lucon (2006), o modelo tradicional estabelecido de 1940 a 1960 colocou nas mãos dos governos federal e estaduais empresas estatais responsáveis por grande parte da produção e distribuição de eletricidade, petróleo e gás.

Para Goldemberg e Lucon (2006), no Brasil, o aumento da produção de energia primária acompanha o crescimento do PIB. Contudo, os autores afirmam que nos últimos trinta anos, o consumo de eletricidade tem aumentado mais rapidamente do que a oferta de energia. Isto devido ao crescente desenvolvimento do setor elétrico e da instalação de indústrias eletrointensivas, como as de alumínio.

Para os autores, o novo cenário demandava um novo modelo. Nesse sentido, foram criadas a Petrobrás, a Eletrobrás e inúmeras empresas estaduais. Além disso, foi estabelecido o planejamento energético brasileiro. O Balanço Energético Brasileiro, segundo Reis et al (2005), demonstra as inter-relações entre oferta, transformação final e uso da energia. Entretanto, o foco principal é o planejamento energético. No Brasil, o primeiro BEN foi elaborado pelo Ministério de Minas Energia em maio de 1976.

Segundo Goldemberg e Lucon (2006), esse modelo funcionou até meados da década de 1980. Dessa forma, manteve baixos os custos da energia e promoveu o desenvolvimento econômico do país.

No entanto, criou também problemas, como tarifas artificialmente baixas para eletricidade, como um esforço em vão de controlar a inflação. Ocorreu também o uso político das empresas de produção e distribuição de gás e eletricidade, com gerenciamento incompetente, além da construção de usinas hidrelétricas para obtenção de benefícios políticos, sem os recursos necessários para completá-los, o que garante ao final, o mínimo de retorno econômico.

Bardelin (2004) afirma que em meados da década de 1990, foi promovida a desestatização parcial do sistema, seguindo o procedimento adotado anteriormente pelos países da Europa Ocidental. Assim, primeiro houve a desverticalização da produção/geração, transmissão e distribuição de energia. Em seguida a introdução de competição na produção/geração, transmissão e distribuição de energia, bem como o livre acesso à rede. E por fim a adoção de agências reguladoras independentes e a privatização das empresas públicas.

Logo, para Reis et al (2005), esse modelo de desenvolvimento permitiu a implantação no Brasil de dois grandes sistemas de transmissão interligados, um nas regiões Norte/Nordeste e outro nas regiões Centro-Oeste/Sul e Sudeste. Esse dois sistemas são ligados por meio da interligação Norte-Sul.

A operação interligada traz vantagens ao dimensionamento de sistemas de transmissão, pois permite o uso otimizado das fontes de geração, e conseqüentemente a redução do custo final, bem como o aumento da flexibilidade operativa.

Reis et al (2005) afirmam que a principal desvantagem da interligação de diferentes sistemas é a necessidade de uma operação segura do ponto de vista da estabilidade entre geradores. Ou seja, um distúrbio em um local pode provocar o desligamento de outros geradores em locais distantes (efeito dominó).

Isto, segundo os autores, pode ser evitado através de um dimensionamento adequado do sistema como um todo, ou seja pela regulação. Nesse contexto, foram criadas as agências do sistema regulatório brasileiro, com a Agência Nacional de Petróleo (ANP) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Goldemberg e Lucon (2006) descrevem que a desestatização do setor elétrico foi apenas parcialmente realizada: ocorreu em cerca 70% da capacidade de distribuição, mas em apenas 30% da geração. Logo, levou a um colapso parcial do

planejamento e à crise do "apagão" de 2001, uma vez que os investidores privados preocupados com incertezas regulatórias se mantiveram arredios a novos investimentos.

Segundo Bardelin (2004) a falta de chuvas contribuiu para que ocorresse o racionamento, mas destaca que da forma como estava sendo gerido o sistema, se o mesmo não acontecesse em 2001 poderia ocorrer em 2002 ou 2003, pois os reservatórios apresentavam queda em seus níveis de armazenamento a cada ano. Nesse sentido, o autor afirma que a causa que levou o país para o racionamento foi a falta de investimentos adequados na geração de energia elétrica.

Para Goldemberg e Lucon (2006) desde então um novo modelo foi adotado pelo Governo Federal a fim de tentar reduzir o risco dos investidores. Dessa forma, foi feito de forma a dividir o mercado gerador de eletricidade em dois segmentos: um composto de consumidores livres e outro de consumidores cativos. Os consumidores livres poderiam escolher seus fornecedores entre produtores independentes por meio de contratos bilaterais. Já os cativos seriam atendidos pelas empresas que formariam uma câmara de transações. Assim, Reis et al. (2005) apontam:

“A função *comercialização* trata da venda de produto ao consumidor, do atendimento técnico comercial (novas ligações, orientações quanto ao uso da energia elétrica) e da prospecção e projeção de mercado. (REIS ET AL, 2005, pg 296).”

Segundo Goldemberg e Lucon (2006), esse modelo foi modificado em 2002 com a criação da Empresa de Planejamento Energético (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que hoje coloca em leilão os empreendimentos que considera necessários para atender à demanda nos próximos cinco anos, baseando-se em projeções futuras da demanda.

Segundo os autores um dos resultados desses leilões foi a maioria da energia comercializada ser proveniente de usinas térmicas, o que não só encarece o custo da energia, como agrava problemas ambientais. Nesse sentido os autores destacam:

“Em outras palavras, o "novo modelo" do setor elétrico está levando o país a abandonar sua vocação natural que é o uso de seu abundante potencial hídrico, uma energia mais limpa e renovável. Dessa forma, é claro o contraste entre a sustentabilidade ambiental e as alternativas que o "novo modelo" privilegiou em nome da urgência (GOLDEMBERG E LUCON, 2006, pg 11)”

Nesse contexto, o Brasil ainda depende do petróleo e do gás e precisa buscar alternativas que reduzam seu consumo. Tradicionalmente, as projeções do governo tratavam o setor do petróleo de forma independente do setor de eletricidade. No entanto, Goldemberg e Chu (2010) afirmam que essa tradição está sendo rompida.

O setor de petróleo continua com o controle nas mãos da Petrobrás, apesar da presença de empresas multinacionais no setor. Embora as reservas provadas de petróleo no Brasil possuam cerca de 11.243 milhões de barris, isso equivale somente a cerca de vinte anos da atual produção. Goldemberg e Lucon (2006), asseguram uma situação confortável para o país a curto e médio prazos.

Nesse sentido, há a definição de metas pelo governo federal para ampliar a participação das fontes renováveis alternativas em seus próximos leilões de energia. Além da construção de grandes hidrelétricas, a adoção de cotas para cada uma dessas fontes e a revisão de sua política de subsídios para o setor energético são algumas das recomendações atuais, presentes no estudo apresentado durante o 8º Congresso Brasileiro de Planejamento Energético em Curitiba.

Parece claro, portanto, que o Brasil está na contramão da história, já que o resto do mundo vem procurando alternativas para diminuir a participação de fontes poluentes na matriz energética. Além da sua contribuição ao "efeito estufa", as impurezas de carvão provocam um fenômeno conhecido há mais de um século nas grandes cidades, o smog, camada de névoa escura altamente tóxica que provoca problemas respiratórios. O óleo combustível também tem os mesmos problemas, ainda que em menor proporção.

Assim, a matriz energética é um conjunto de balanços energéticos periódicos, construída para um período de tempo futuro (20 anos), considerando diferentes cenários de evolução dos fatores que podem afetar a matriz. Dessa forma, devidamente construída, é um instrumento para o estabelecimento de políticas públicas. Logo, a busca por fontes alternativas de energia, deve ser premissa essencial no estudo da matriz energética brasileira.

2 O SETOR ELÉTRICO NO DISTRITO FEDERAL

2.1 A ENERGIA ELÉTRICA NO DF

O subcapítulo aborda o histórico da energia elétrica vinculada a construção da Capital Federal. Assim, descreve a matriz energética do DF desde a época da construção de Brasília, até seu desenvolvimento para a situação atual. Ao longo do texto são ressaltadas questões referentes a falta da independência do setor elétrico do Distrito Federal, e sua demanda cada vez maior de energia devido a expansão urbana. Além disso, trata da capacidade de instalação de sistemas de abastecimento de forma direta, por meio de fontes de energia alternativas, em regiões com grande extensão territorial desocupada. Para tanto, são analisados os relatórios da CEB (2013), do MME (2013), Embaixada Verde (2013), bem como da ANEEI (2013).

Segundo a CEB (2013), na época da construção de Brasília não existia nenhuma fonte de geração de energia nas proximidades. Além disso, devido a imposição da data de inauguração da nova capital a 21 de abril de 1960, o prazo era curto para a instalação de uma fonte de energia local e de caráter definitivo.

Dessa forma, um suprimento provisório de abastecimento de energia foi feito em 1956, na cidade em construção, através de medidas emergenciais, de forma a atender as atividades administrativas desenvolvidas no canteiro de obras. Foram adquiridos dois motores elétricos à diesel de 90 KVA cada. Em 1957, uma pequena usina hidráulica de 10 HP foi projetada ao lado do Catetinho^{viii}. Foi instalada em pequeno afluente do Ribeirão do Gama e abastecia a casa do presidente e a Fazenda do Gama, onde se instalou a estação de rádio da empresa aérea Panair do Brasil.

Já em 1958, outras usinas foram construídas, como a Usina - Piloto de Saia Velha^{ix} com duas unidades de 200 kVA, que abastecia através de uma linha de transmissão de 22 km de extensão os escritórios, oficinas, serrarias, olaria e residências da NOVACAP, além do aeroporto. A Usina Hidrelétrica da Granja do Ipê de 25 HP, e por fim a Usina Paranoá, com 17.000 KW, que ficou pronta em 1962. Nesse mesmo ano, a primeira Usina Térmica de Brasília foi construída, com 10 KW de potência, além de uma Usina a Diesel/Elétrica de 5700 KW.

Em seguida, a rede elétrica de distribuição definitiva foi montada. Decidiu-se aproveitar a energia produzida na Usina Hidrelétrica de Cachoeira Dourada, construção em andamento na época a 400 km da futura Brasília. Foram adquiridos os equipamentos para a Subestação abaixadora de Brasília, que se interligaria com

^{viii} A construção de uma pequena usina hidráulica no Catetinho serviu para abastecer a primeira residência do Presidente no Planalto Central (CEB, 2013).

^{ix} A usina de Saia Velha foi construída para energizar os escritórios, oficinas, serrarias, olaria, aeroporto e residências da NOVACAP (CEB, 2013).

Usina de Cachoeira Dourada por meio de uma linha de transmissão, isolada para 230 kV, com extensão aproximada de 400 km. Essa linha de transmissão foi energizada em agosto de 1959 e, a partir daí, a capital começou, efetivamente, a receber energia elétrica proveniente de Cachoeira Dourada. Assim, a cidade começou a receber energia da usina de 10.000 KW, situada na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás. A rede de distribuição de Brasília foi implantada de forma definitiva, funcionando com circuitos subterrâneos e aéreos.

Autorizada pelo Poder Concedente a funcionar como empresa de energia elétrica consoante Decreto 45.410, em 1959 a NOVACAP iniciou a implantação da rede elétrica de distribuição da futura Capital em conformidade com um projeto cujas características básicas eram: Rede de subtransmissão, na tensão de 34,5 kV, originária da Subestação Abaixadora de CELG, parte em circuitos aéreos e parte em circuitos subterrâneos dentro do perímetro urbano. Subestações abaixadoras de 34,5/13,8 kV, num total previsto de 8, inicialmente, e que iriam totalizar cerca de 360 mVA de capacidade de transformação, na etapa final. Rede de distribuição, na tensão de 13,8 kV, constituída de circuitos subterrâneos, que alimentariam as subestações das superquadras e dos edifícios públicos construídos.

No entanto, esse suprimento inicial de energia exigia um nível de racionamento energético da população. Diante das medidas adotadas, em termos de suprimento, as disponibilidades então existentes eram bastante limitadas. Embora houvesse uma garantia de fornecimento, foi possível atender ao crescimento acelerado da carga até meados de 1964, quando começou a evidenciar-se um período de insuficiência das fontes geradoras de energia elétrica.

Assim, ao final desse ano, a máxima demanda registrada era de 32.700 kW, com redução de tensão de até 10% no sistema. Contra uma disponibilidade aparente de 38.700 kW, sem reservas. Dessa forma, no início da década de 60 o Departamento da Força e Luz (DFL) criou a Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (NOVACAP), órgão responsável pelos serviços de eletricidade no Distrito Federal.

Além da NOVACAP, outras empresas do setor elétrico brasileiro foram destinadas pelo Ministério de Minas e Energia (MME) a dar suprimento à Brasília, como Centrais Elétricas de Minas Gerais S/A (CEMIG), Centrais Elétricas de de Goiás S/A (CELG) e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). Em 1964, com o auxílio dessas empresas, algumas medidas fundamentais para a regulação e desenvolvimento do setor energético da capital foram estabelecidas.

Segundo a CEB (2013) as medidas permitiriam o atendimento das cargas do mercado do Distrito Federal, caracterizado pela seguinte composição de fontes de

suprimento: fontes locais (Usina do Paranoá, com 25.500 kW e unidades térmicas, com 21.600 kW, totalizando a disponibilidade máxima de 47.100 kW), e suprimento externo (aumentando sucessivamente, de acordo com o crescimento de demanda, em decorrência de medidas tais como a mudança de tensão da linha de transmissão Cachoeira Dourada/Brasília, de 138 kV para 230 kV, e os acréscimos de unidades geradoras na Usina de Cachoeira Dourada).

Dessa forma, segundo o MME (2013), a primeira medida, realizada em 1967, foi a criação de um Grupo de Trabalho. Os aspectos analisados no grupo foram quais seriam as medidas de emergência possíveis destinadas à reforçar, à curto prazo, o suprimento de energia elétrica ao Distrito Federal, bem como examinar, em termos comparativos, as características das novas fontes de suprimento e a expansão das fontes existentes. Ao final, foi recomendado um programa de ação de governo, visando ampliar a capacidade geradora do sistema, a partir de 1970. Além disso, foram estudadas as condições em que se encontravam as concessões dos serviços de eletricidade no Distrito Federal, de forma a recomendar as providências para o seu aprimoramento.

Um dos resultados mais importantes de conclusão do grupo de trabalho foi o ato de constituição da Companhia de Eletricidade de Brasília (CEB), em 1968. Com isso, o DFL da NOVACAP foi substituído pela Companhia, uma empresa de economia mista, com mais autonomia e flexibilidade administrativa. No entanto, quanto à área técnica, o serviço da CEB limitou-se à expansão e melhoria das redes de distribuição, pois aguardava a definição de um plano de atendimento à Capital, em caráter definitivo. De modo que, a partir dele, pudesse ser desenvolvido um programa de obras de subtransmissão para as cidades satélites e, ainda o suprimento definitivo às subestações previstas no projeto elétrico original para o Plano Piloto.

Em 1970, a diretriz aguardada foi cumprida. Assim foi assinado um acordo de investimento, bem como de compra e venda de energia elétrica entre a Usina de Furnas^x, a CEB e as Centrais Elétricas de Goiás S/A, com a interferência da Eletrobrás. Esse acordo visava suprir a demanda de energia elétrica da crescente população da cidade, transferindo a responsabilidade do suprimento de energia elétrica ao Distrito Federal, da CELG para Furnas.

^x A Usina de Furnas (Furnas Centrais Elétricas S.A.) é uma empresa de economia mista subsidiária da Eletrobrás, vinculada ao MME, e atua no segmento de geração e transmissão de energia em alta e extra-alta tensão. Está sediada na cidade do Rio de Janeiro e atua em todas as regiões do Brasil, desde 1957. A empresa opera com doze usinas hidroelétricas e duas termoelétricas com capacidade instalada de 10.050 MW. Além disso possui 49 subestações com mais de 19.000 km de linhas de transmissão, atendendo a 51% das residências brasileiras, o que corresponde a 65% do PIB brasileiro (MME, 2013).

Dessa forma, partir de 1973, a responsabilidade de suprimento em grosso de energia à Capital era da Usina de Furnas, de modo a empreender por completo a construção de linhas de transmissão e subestações, além de usinas hidroelétricas. Nesse acordo, à CEB caberia planejar e executar a solução definitiva do suprimento de energia. É importante ressaltar que o excedente de geração da Usina de Cachoeira Dourada, decorrente dessa transferência de mercado, passou a ser adquirido por Furnas, compensando assim o prejuízo que poderia advir, para a CELG, em função de uma drástica redução de seu fornecimento de energia elétrica.

Em seguida, cabia a CEB planejar e executar um programa de longo prazo, visando adaptar seu sistema elétrico à uma solução definitiva de suprimento para o DF. Assim, em 1976, entrou em operação o Centro de Operação do Sistema (COS), com a finalidade de supervisionar a rede elétrica de Brasília, através de computadores vinculados à CEB. De 1975 a 1977 a CEB, através do convênio assinado com o INCRA, deu início ao programa de eletrificação rural.

Com o ritmo efervescente da ocupação do Distrito Federal, as cidades satélites acompanharam a evolução de Brasília. Nesse sentido, as taxas de crescimento do consumo de energia elétrica, chegaram a ordem de 30% ao ano. No plano urbanístico, entre 1974 e 1978, Brasília assistiu à ampla reforma do seu sistema interno, acompanhado da duplicação de várias estradas-parque e da implantação da via Estrutural.

Por longo período, a CEB atendeu a seu mercado consumidor sem restrição de oferta, a despeito dos choques de petróleo que determinaram a total paralisação de seu parque gerador de base térmica. Em 1978, a maioria das cidades satélites receberam ligação definitiva.

Nos anos 80 o setor investiu em subestações de transmissão. Duas foram ampliadas, a de Taguatinga e a de Brasília Norte e, até o final da década, seriam construídas mais doze. Em 1987 a CEB começou a desenvolver o projeto na área de economia e conservação de energia elétrica, como os projetos PROCEL nas escolas, diagnóstico energético e substituição de lâmpadas incandescentes por vapor de mercúrio e vapor de sódio no sistema de iluminação pública.

Na década de 90 as ações no setor foram marcadas pela execução de obras de grande alcance social, como a implantação de infra-estrutura de energia elétrica nos novos assentamentos urbanos criados no Distrito Federal pela CEB.

Em 1991, foi lançado o Programa Alumiar, com previsão de instalação de energia elétrica em 3 mil unidades consumidoras rurais. Em 1993, a Companhia de

Eletricidade de Brasília se torna a Companhia Energética de Brasília, dessa forma, a CEB ampliou seus mercados de atuação. Assim, além da distribuidora oficial de eletricidade do DF, assumiu, também, a permissão para distribuição do gás canalizado e outras fontes de energia na região.

Com o advento do Plano Real em 1994, o novo modelo para o Setor Elétrico Brasileiro caminhava em direção à privatização. A CEB, no entanto, permaneceu sob o controle do Governo do Distrito Federal. Para isso tem-se envolvido em profundas transformações associativas no negócio de geração de energia elétrica, na diversificação da oferta de energia como investimentos na geração de gás natural a na competição para a oferta de serviço de telecomunicações.

Em 1995, o Programa Alumiar 2 levou energia a mais 2,5 mil propriedades. Em 1997 a CEB investiu na área de transmissão, construindo mais três subestações: uma no Paranoá, outra em Santa Maria e outra em Águas Claras.

A CEB estrategicamente começou a investir em novos negócios, como Telecomunicações, Transmissão de Dados, Serviço de Consultoria e Produção de Energético e ainda, autorização da subsidiária integral - CEB Participações SA (CEBPar), através da Lei Distrital nº 1788 de 1997. Também neste ano, a CEB, obteve a concessão para construção de duas usinas hidrelétricas, em parceria com outras empresas: Queimado, em Minas Gerais; e Lajeado, em Tocantins, visando diminuir sua dependência com relação a Furnas e Itaipu.

Nesse sentido, a CEB assinou em 1999 contratos de concessão de energia elétrica, com vigência até 2015, com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Visava a exploração do potencial de energia hidráulica da UHE Paranoá, e, até 2015, para geração termoelétrica da UTE Brasília.

No final da década de 90, houve um convênio com a CELG para construção de um gasoduto para Brasília, e a elaboração da proposta de construção de uma Termoelétrica no Distrito Federal. Ainda foi assinado protocolo de intenções entre o Distrito Federal, o estado do Goiás e a Petrobrás, com a interveniência da Eletrobrás, objetivando estudos de viabilidade técnico-econômica da oferta de gás natural e instalação de usinas para atender o mercado do Centro-Oeste. Neste mesmo ano foi celebrado o Consórcio CEMIG/CEB.

No ano de 2000, a CEB investiu em geração de energia em três projetos: Usina de Lajeado, Usina Queimado e Usina Corumbá IV. Além disso, foi promulgada a Lei Distrital nº 2.518, que autoriza a criação da Companhia Brasiliense de Gás. No mesmo ano, a CEB Participação S.A iniciou suas operações com o objetivo de

comprar e vender participação acionárias ou cotas de outras empresas energéticas, de telecomunicação e de transmissão de dados. Por fim, somente nesse ano, a empresa foi autorizada a criar a CEB Geração, segundo a Lei Distrital nº 2.648, que tem como objetivo a geração e a comercialização de energia produzida pelas usinas do Paranoá e Térmica.

O ano de 2001 foi marcado pelo grande apagão do setor elétrico brasileiro. Os baixos níveis de armazenamento dos reservatórios obrigaram o Governo Federal à criar a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica, com o objetivo de administrar programas de ajuste da demanda, coordenar esforços para aumento da oferta e implantar medidas de caráter emergencial necessárias para reverter a situação hidrológica crítica.

Instituiu-se o racionamento compulsório para as regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste, atingindo um patamar de 20% de redução no consumo dos clientes na área de atuação da CEB. Foi ainda criado o Programa Emergencial da Redução de Consumo de Energia Elétrica, impondo a população medidas que incluem a suspensão do fornecimento de energia elétrica para determinados empreendimentos, regimes especiais de tarifação e limites de uso e fornecimento de energia elétrica.

Assim, nesse mesmo ano, pela Lei Distrital nº 2.710, o GDF autorizou a reestruturação societária da CEB. A empresa continuou investindo grande parte de seus recursos financeiros em geração de energia nas Usinas: Luis Eduardo Magalhães, Corumbá IV, Corumbá III e Queimado. Ainda neste ano ocorreu uma perda no consumo de energia elétrica da ordem de 13% devido ao racionamento.

Em 2002 o mercado de fornecimento de energia da CEB cresceu 4,4% em relação a 2001, mas os resultados econômicos e financeiros da Companhia foram impactados, sobretudo pela desvalorização do real frente ao dólar americano, pela variação dos índices que corrige os preços internos e contratos e, pelos reflexos do Programa de Racionamento de Energia Elétrica extinto em fevereiro de 2002. A Companhia registrou, assim, um prejuízo de R\$ 174.410 mil, sendo que parte deste foi absolvido pelas reservas de lucros e de capital. Ampliação das Subestações: Brasília Norte(138 kV) e Santa Maria, que foi transformada de 69 kV para 138 k.

Em 2004, devido a revisão tarifária a ANEEL considerou na tarifa apenas cerca de 60% dos custos operacionais até então praticados pela CEB. A partir disso a empresa fez uma adequação nos seus custos para se ajustar à nova receita a ser obtida a partir da nova tarifa. O novo marco do setor elétrico também trouxe a

necessidade de adequação da empresa a novas regras, em especial as estabelecidas nas leis 10.847 e 10.848 de março de 2004.

Assim, no Planejamento Empresarial Corporativo de 2004 foi atualizado o processo de gestão estratégica com a implantação do Balanced Scorecard que incorpora o gerenciamento de indicadores de desempenho já praticada na empresa, mas acrescenta um conjunto de medidas representativas e integradas que vincula o desempenho segundo as perspectivas do desenvolvimento regional, sócio/ambiental, econômico/financeira, clientes/mercado, processos internos e conhecimento, infraestrutura e aprendizado do patrimônio humano. Nesse mesmo ano aconteceu o XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica em Brasília (SENDI 2004), uma promoção da Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica (Abradee) e organização da Companhia Energética de Brasília (CEB). Os quatro dias do evento foram marcados por intensos debates sobre temas de relevância nacional, como novo modelo de setor elétrico, eficiência e matriz energética, pesquisa e tecnologia, responsabilidade social, entre outros. Com a restauração do setor elétrico, a CEB modificou sua visão empresarial passando de simples distribuidora de energia elétrica para uma atuação na área de geração.

Em suma, no que se refere a fontes de suprimento de energia elétrica no DF, a CEB mantém uma unidade em funcionamento em Brasília a Usina Hidrelétrica do Paranoá, que representa somente 2,6% da energia requerida. A Usina Termoelétrica de Brasília só funciona em casos emergenciais, assim o restante é adquirido de FURNAS com 75,0% e ITAIPU com 22,4%.

Em 2005, a CEB priorizou obras de Iluminação Pública em parceria com o GDF. Além da expansão da iluminação, outro importante projeto da CEB foi a iluminação de Realce, que é feita em pontos históricos do DF promovendo a promoção do turismo da cidade. Em novembro do mesmo ano foi inaugurada a Usina Hidrelétrica de Corumbá IV. A ideia é gerar o desenvolvimento sócio-econômico da região, por meio da implementação de um pólo turístico e de lazer, além de tentar atender a crescente demanda do Distrito Federal e seu entorno. Além disso, pretende-se diminuir a dependência do suprimento de energia na região em relação a Usina de Furnas.

Atualmente, o Distrito Federal possui sete empreendimentos em operação, gerando no total 45.918 KW de potência. As fontes são três: fotovoltaica (central geradora solar fotovoltaica - UFV), hidrelétrica (usina hidrelétrica - UHE) e termoelétrica (usina termoelétrica - UTE). O **quadro 01** ilustra a quantidade de cada uma, bem como a sua potência instalada.

EMPREENHIMENTOS EM OPERAÇÃO NO DISTRITO FEDERAL			
TIPO	QUANTIDADE	POTÊNCIA (KW)	%
UFV	1	50	0,11
UHE	1	29.700	64,68
UTE	5	16.168	35,21
TOTAL	7	45.918	100

Quadro 01. Empreendimentos em operação no Distrito Federal
(adaptado de ANEEL, 2013)

Segundo a Aneel (2013), a UFV pertence a Embaixada Italiana de Brasília, e possui a destinação de registro, ou seja, fornece informações públicas sobre autoprodução de eletricidade limpa. O projeto Embaixada Verde teve início em 2010, com o apoio da UnB, CEB, Ministério de Relações Exteriores Italiano, Caesb, e o Ministério Italiano do Meio Ambiente. Com potência de 49.01 KW, possui 405 painéis fotovoltaicos instalados no telhado, além de um sistema de fitodepuração das águas. Segundo a embaixada, o objetivo do projeto é utilizar os dados coletados nos dois sistemas para traçar um perfil da viabilidade técnica e financeira de tais tecnologias.

Devido ao desenvolvimento da proposta a sede diplomática recebeu a certificação Green Building Plus Rina, emitida pelo Grupo Rina - Registro Navale Italiano, avaliando-a como edifício eco-sustentável. A eletricidade produzida pela planta solar nas horas diurnas, quando a irradiação solar é consistente, é superior ao consumo total do edifício. O excesso produzido é cedido à rede elétrica que restituirá a quantidade análoga de energia nos períodos vespertino e noturno (EMBAIXADA VERDE, 2013).

Os dados disponíveis até agora pela Embaixada Verde (2013), demonstram que a produção de energia foi de 86.162 KWh/ano, e que o consumo médio de energia após a instalação da planta solar diminuiu em 17%. A previsão de vida útil da usina é de 30 anos, dessa forma, a previsão de redução na emissão de CO₂ é de 7,6 toneladas/ano. O custo de instalação foi de R\$ 394.400,00, e a economia estimada em 1 ano se deu na ordem de R\$ 22.800,00. Em 2013 houve a instalação de um sistema de micro-geração eólica integrada ao sistema fotovoltaico.

Já a Usina hidrelétrica, da CEB, a Usina Paranoá, destina sua energia ao serviço público. É a única usina local que abastece o Distrito Federal, no entanto supre somente uma pequena parcela da demanda de energia. Localizada na

barragem do lago Paranoá, apresenta um caráter estratégico de fornecimento de energia para a Esplanada dos Ministérios e Praça dos Três Poderes.

As Usinas termoelétricas são quatro: Brasília (10.000 KW), Parque de Diversões Nicolândia (508 KW), Senado Federal (3.200 KW), Federação Nacional Comunidade Evangélica Sara Nossa Terra (40 KW), todas funcionando com óleo diesel (combustível fóssil). A primeira usina destina sua energia ao serviço público, e o restante possui registro de mini ou micro geradores.

O **quadro 02** representa o balanço energético do DF nos anos de 2008 a 2012. Percebe-se que o consumo total de energia elétrica aumentou ao longo dos anos, assim como a quantidade de energia recebida de usinas fora do estado.

BALANÇO DE ENERGIA ELÉTRICA NO DISTRITO FEDERAL (2008-2012)					
BALANÇO	ENERGIA ELÉTRICA (MWh)				
	2008	2009	2010	2011	2012
Energia recebida	5.688,335	6.006,569	6.418,970	6.699,506	6.972,105
CEB geração - Corumbá III	-	71,914	340,746	408,179	344,778
CEB geração - Corumbá IV	581,075	609,773	483,875	531,367	463,128
CEB geração - Paranoá	113,315	124,853	107,807	117,770	124,637
De Itaipu	1.154,033	1.124,130	1.119,066	1.113,965	1.109,261
De Furnas	3.839,912	4.075,899	4.367,476	-	-
Do Sistema Integrado Nacional - SIN	-	-	-	4.528,225	4.930,301
Energia recebida	5.688,335	6.006,569	6.418,970	6.699,506	6.972,105
Carga própria	5.688,335	6.006,569	6.418,970	6.699,506	6.972,105
Perdas	770,209	763,254	819,204	783,861	793.112

Consumidor livre	365,055	207,253	217,131	446,190	513,230
Consumo total	4.553,070	5.036,062	5.382.636	5.469,453	5.665,762

Quadro 02. Balanço energético do Distrito Federal (adaptado de CEB, 2013).

Já o **quadro 03** apresenta o consumo em MW/h de energia por região administrativa. Há uma grande concentração de consumo no Plano Piloto, visto que essa região é o centro comercial da cidade. No entanto, todas as regiões administrativas apresentaram crescente demanda de energia, visto que a cidade se encontra em desenvolvimento e expansão urbana. Assim, bairros novos como Águas Claras, aparecem no quadro, só que ainda não possuem medição catalogada do consumo de energia elétrica.

REGIÕES ADMINISTRATIVAS	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (MW/h)			
	Total	Residencial	Industrial	Comercial
2012				
DISTRITO FEDERAL	5.665,762	2.074,439	240,061	1.903,666
Plano Piloto	1.904,077	257,376	30,637	980,701
Gama	225,006	92,594	40,143	44,976
Taguatinga	813,488	356,638	49,109	261,370
Brazlândia	82,264	30,560	9,209	12,197
Sobradinho	215,466	125,983	9,907	39,304
Planaltina	214,547	96,256	8,385	25,495
Paranoá	90,112	54,701	1,422	10,107
Núcleo Bandeirante	112,857	56,135	1,687	32,189
Ceilândia	510,758	240,151	5,039	78,495
Guará	320,677	118,523	19,040	148,447
Cruzeiro	207,230	96,592	5,014	81,497
Samambaia	247,713	123,414	40,193	37,259
Santa Maria	142,175	70,217	14,961	28,966

São Sebastião	92,390	55,464	1,218	14,260
Recanto das Emas	96,465	63,457	308	14,628
Lago Sul	188,800	112,253	923	47,066
Riacho Fundo	71,706	48,902	318	10,818
Lago Norte	108,418	62,340	1817	30,074
Candangolândia	21,613	12,883	731	5,817
Águas Claras	...	...	...	...
Riacho Fundo II	...	...	...	...
Sudoeste/Octogonal	...	...	...	...
Varjão	...	...	...	...
Park Way	...	...	...	...
SCIA(1)	...	...	...	...
Sobradinho II	...	...	...	...
Jardim Botânico	...	...	...	...
Itapoã	...	...	...	...
SIA(2)	...	...	...	...
Vicente Pires	...	...	...	...
Fercal	...	...	...	...

Quadro 03. Consumo de energia elétrica no Distrito Federal (adaptado de CEB, 2013).

Dessa forma, embora a CEB abasteça o DF com 31 subestações espalhadas pelas regiões administrativas (**anexo 01**), o consumo cada vez maior, e a crescente demanda de energia da região suscitam o desenvolvimento de alternativas viáveis para o problema do setor elétrico.

O DF sofreu consequências do racionamento ocorrido na maioria das regiões brasileiras em 2001 apresentado no capítulo anterior. Nesse sentido, é necessário o investimento no setor, pois o racionamento possivelmente não será o último.

Logo, é essencial o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias, que possam complementar cada vez mais a distribuição local, e a longo prazo, eliminar a dependência das grandes usinas hidrelétricas como Furnas e Itaipu e atender a crescente demanda de energia da capital federal.

3 A CHAMINÉ SOLAR

3.1 ANTECEDENTES DA CHAMINÉ SOLAR

Neste tópico são apresentados os antecedentes das Chaminés Solares. Desde 1903 existem estudos sobre o funcionamento de sistemas com base no efeito chaminé. Por isso, antes de se iniciar a descrição dos antecedentes da Chaminé Solar, é feita uma breve explicação de como funciona o sistema como o conhecemos hoje por Schlaich (1995). Os autores tratados neste capítulo são Bernardes (2010), Dufour (2008), Schlaich (1990), (2002) e (2003), Neves (2005), Bernardes et al. (2003), Gannon e Von Backstrom (2000), Von Backstrom e Gannon (2004), Bonelle (2005), Ketlogetswe et al. (2008) e Shasha (2010).

A central apresentada por Schlaich (1995) utiliza uma estufa (o coletor), para ajudar no processo de aquecimento do ar, a fim de promover a movimentação entre o ar quente perto da superfície e o ar fresco das camadas superiores da atmosfera. Desse modo, o ar quente pode ser canalizado para um tubo com grande altura (a chaminé). Logo, a tecnologia da Usina Chaminé Solar baseia-se em um princípio simples, a convecção (efeito chaminé): o ar quente tende a subir, pois possui peso menor do que o ar frio.

Segundo o autor, o projeto consiste em uma central térmica, provida de uma superfície coletora, de material transparente (vidro ou policarbonato), com um tubo vertical (chaminé de concreto ou aço), por onde o ar tende a entrar, movendo turbinas que se encontram no seu interior. O sistema converte energia cinética em energia elétrica com um sistema gerador de turbinas (**Figura 3**).

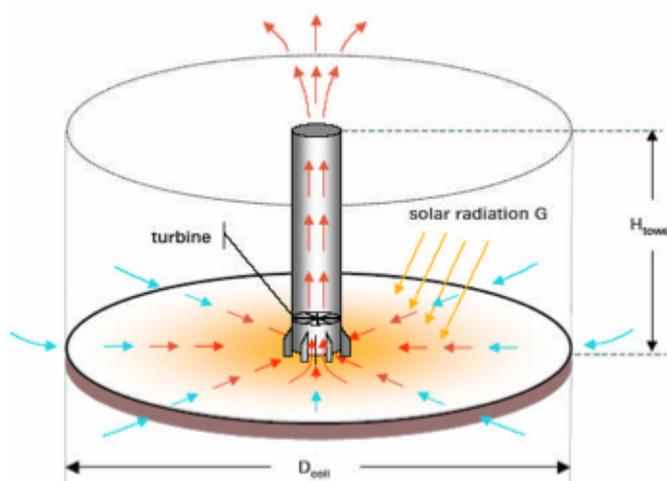


Figura 3. O funcionamento da Chaminé Solar. (SCHLAICH ET AL., 2003, pg 01).

Nesse sentido, a radiação solar atravessa a superfície transparente, que funciona como uma estufa, e em seguida se choca com o solo, gerando várias irradiações com comprimentos de onda diferentes no interior do coletor. No subsolo, são propostas centrais de armazenamento térmico auxiliares, que junto com a evaporação, garantem o funcionamento do sistema por 24 horas, mesmo sem a incidência solar direta (**Figura 4**). Além disso, segundo Dufour (2008), a superfície do terreno embaixo do coletor permite que pessoas caminhem e tenham acesso a toda sua extensão, pois a temperatura no seu interior não passa de 40° Celsius (**Figura 5**).

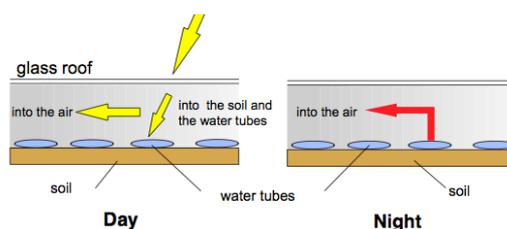


Figura 4. O funcionamento da Chaminé Solar durante a noite. (SCHLAICH ET AL., 2003 pg 03).

Assim, merece destaque esta interessante característica arquitetônica e espacial do projeto: o possível uso dos locais logo abaixo dos coletores (**Figura 6**). Segundo Schlaich (1995), grande parte da área no interior do coletor pode ser utilizada como uma estufa normal. Isso permite que se cultivem alimentos nestas áreas^{xi}. Neves (2005), sugere o cultivo de plantas de valor medicinal ou cosmético, servindo como fonte de receita para a região em que a tecnologia for aplicada.



Figura 5. O uso do interior do coletor. (SCHLAICH, 2003, pg 04).

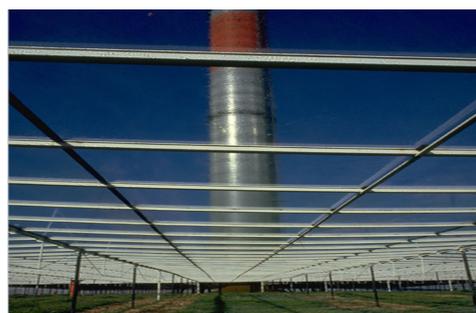


Figura 6. O interior do coletor. (SCHLAICH, 1995, pg 16).

^{xi} Uma pequena central poderá criar cerca de 1.500 postos de trabalho na agricultura (NEVES, 2005).

Segundo Bernardes (2010), um dos primeiros estudos das Chaminés Solares foi a descrição de Isidoro Cabanyes, um coronel da artilharia espanhola, cujo artigo, “Proyecto de Motor Solar” (Projeto de Motor Solar), foi publicado em 1903, na Espanha. A tecnologia foi inicialmente pensada como um aquecedor de ar ligado a uma casa com uma chaminé. No interior da casa existia uma espécie de hélice eólica, com a finalidade de produção de energia elétrica (**Figura 7**).

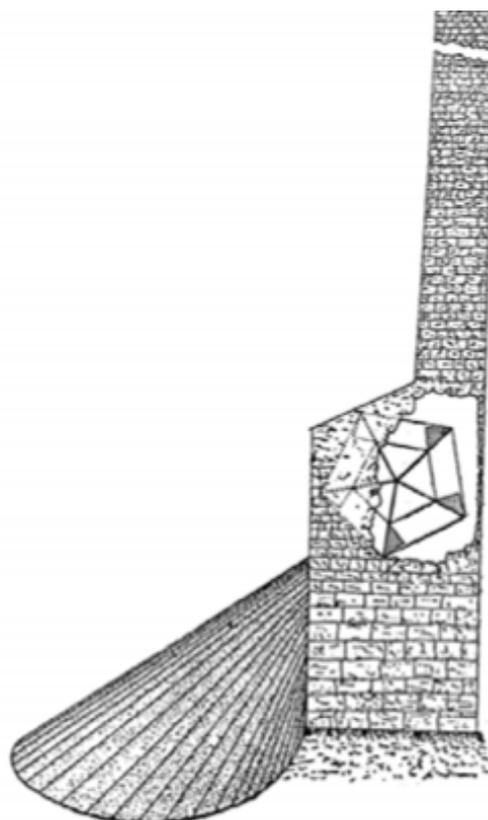
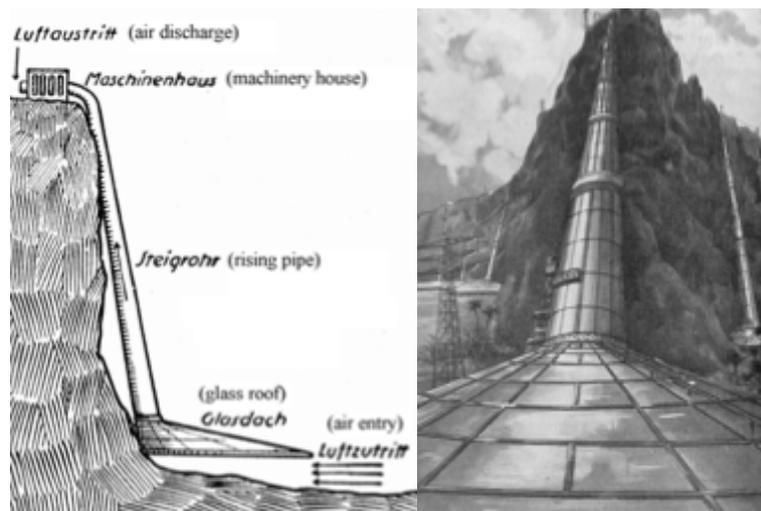


Figura 7. A representação em 1903. (BERNARDES, 2010, pg 172).

Segundo Günther (1931) apud Bernardes (2010) em 1926 o professor francês Bernard Dubois propôs a implantação de uma Usina Chaminé Solar no norte da África. O modelo foi apresentado na Academia Francesa de Ciências e previa uma Chaminé Solar no topo de uma montanha (**Figuras 8 e 9**). O autor afirma que a velocidade do ar ascendente de 50 m/s poderia ser alcançada na chaminé, cuja energia poderia ser extraída por turbinas eólicas.



Figuras 8 e 9. Representações da Chaminé Solar em 1931. (GUNTHER (1931) APUD BERNARDES (2010), pg 173).

Dufour (2008) afirma que nos anos oitenta, um protótipo, com picos de até 50 KW de potência, operou por mais de 15.000 horas, em Manzanares, Espanha, 150 km ao sul de Madri (**Figura 10**). O projeto, de autoria do Professor Doutor Schlaich, com fundos do Ministério de Pesquisa e Tecnologia da Alemanha, funcionou de 1982 a 1989, e possuía um coletor de 240 m de diâmetro a 2 m de distância do solo, com uma torre circular de 195 m de altura e 10 m de diâmetro. Segundo Schlaich (1995), a meta desta pesquisa era verificar, a partir de equipamentos de medida de campo (180 sensores), a eficiência dos cálculos feitos na teoria (túneis de vento). No entanto, esse primeiro teste de aplicabilidade demonstrou que a torre, da maneira em que foi projetada, tinha baixo rendimento, com eficiência termodinâmica de somente 5%.

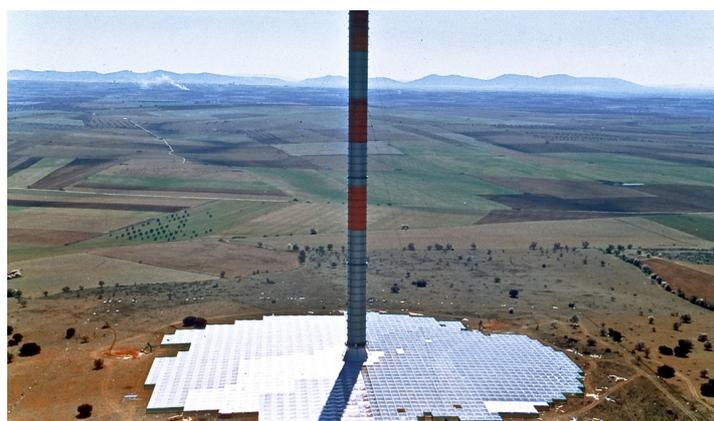


Figura 10. O protótipo de Manzanares (SCHLAICH, 1995, pg 16).

Segundo Schlaich et al. (2003), Haaf (1983) apresenta os resultados do teste e uma descrição teórica do protótipo torre solar em Manzanares.

Schlaich (2002) apresenta uma visão geral, e descreve os seguintes testes executados no curso do projeto: em 1986, foi feito um trabalho de melhoria estrutural do sistema, obra que ocasionou algumas interrupções operacionais. Em seguida, entre 1986 e 1989, a Chaminé Solar operou diariamente, exceto por um período de quatro meses, o qual foi reservado para medições especiais e modificações específicas. Assim, durante este período de 32 meses, a planta funcionou de forma totalmente automática, com uma média de 9 horas de rendimento por dia, e um total de 8611 horas de operação.

Segundo Neves (2005), a partir do momento em que a velocidade do ar na chaminé ultrapassasse 2,5 m/s, a central começava a trabalhar em modo automático. A central estava ligada à rede elétrica local.

Nesse período, uma pessoa, no máximo, era suficiente para exercer a supervisão do sistema. Nesse sentido, danos causados por tempestades esporádicas na área do coletor foram reparados sem a necessidade de desligar a torre.

Assim, após as análises, o autor pode determinar que o projeto possui cerca de 95% de confiabilidade. O período de 5% não operacional ocorreu devido ao desligamento automático do sistema no fim de semana pela rede espanhola de distribuição de energia.

Kreetz (1997) apud Schlaich et al. (2003) introduz o conceito de utilização de bolsas com água sob o coletor para o armazenamento térmico. Gannon e Von Backstrom (2000) apresentam uma análise do ciclo termodinâmico da torre solar, e também uma análise das características das turbinas em 2004. Ruprecht et al. (2003) apud Schlaich et al. (2003) dão resultados de cálculos dinâmicos de fluidos e design de turbina para uma torre de 200 MW. Já a análise térmica e técnica de segmentação por meio de cálculo computacional é descrita por Bernardes et al. (2003). Este faz o uso de dados climáticos de Petrolina, Pernambuco, para a análise de viabilidade de implantação e desempenho de Chaminés Solares no Brasil.

Desse modo, Bernardes (2010) afirma que após a operação do primeiro protótipo, vários estudos podem ser encontrados sobre as torres. Eles incluem modelos de estados transitório e estável da dinâmica de fluidos, bem como, a análise estrutural para chaminé, coletor e instalações de turbinas, incluindo a capacidade de armazenamento de calor de acordo com o tipo de solo.

Em 2002, o Ministério da Indústria Australiano aprovou o projeto de um protótipo com vinte anos de vida útil conhecido como Torre Solar Buronga, mais eficiente que o anterior na Espanha. Proposto por uma sociedade privada, a Enviromission, poderia produzir até 750 GWh de energia elétrica, dezessete vezes mais que a proposta de Manzanares.

A empresa projetou um protótipo da Torre Solar com 200 MW de potência, no Deserto Novo Gales, Austrália. A intenção era gerar energia a partir de 2005, através de um coletor de 7 km de diâmetro, com uma torre de 1 000 m de altura (**Figuras 11 e 12**). No entanto, Bonnelle (2005) afirma que a obra até hoje não foi concluída. Se implantada, possui força o bastante para fornecer energia suficiente para a demanda de 200 000 habitantes. Segundo Dufour (2008), a torre iria ter um custo aproximado de 847 milhões de reais, com tempo de amortização de quarenta anos.



Figuras 11 e 12. Representações da Chaminé Solar em 2005.
(ENVIROMISSION, 2012)

A partir desses estudos a empresa alemã Schlaich Bergermann, apoiada pelo Ministério do Meio Ambiente Espanhol e com a participação da Universidade de Castilla-La Mancha, estudaram a proposta em um protótipo de 40 MW de potência em Fuente del Fresno, Cidade Real. Segundo Dufour (2008), o projeto, conhecido como Torre Solar Cidade Real, não foi construído por falta de financiamento.

Segundo Schlaich (1995) a Chaminé Solar como fonte de produção de energia possui vantagens em relação a outras tecnologias. O coletor utiliza tanto a radiação difusa quanto a direta, o solo fornece armazenamento natural de calor, o baixo número de peças rotativas garantem a confiabilidade e pouca manutenção do sistema, não é necessária a utilização de sistema de resfriamento, e o uso de materiais simples como o concreto e tecnologias conhecidas em sua construção.

Nesse contexto, e com base na necessidade de planos estratégicos de longo prazo, o Ministério da Ciência e Tecnologia de Botswana, África, construiu um protótipo, em pequena escala, do sistema da Chaminé Solar pra estudos e pesquisas na área. O protótipo funcionou de outubro a novembro de 2005, e possuía um coletor de 160 m² de área, com vidro de 5mm de espessura, apoiado em uma estrutura de aço. Já sua torre foi projetada com 2 m de diâmetro e 22 m de altura, feita de poliéster reforçado com vidro. O solo abaixo do coletor, foi preparado para receber o coletor com uma camada dupla de solo compactado (aproximadamente 10 mm), coberta por pedregulhos. Segundo Ketlogetswe et al. (2008), alguns parâmetros foram medidos a partir do modelo com o uso de 11 sensores e alguns data loggers em diferentes posições (**Figura 13**).

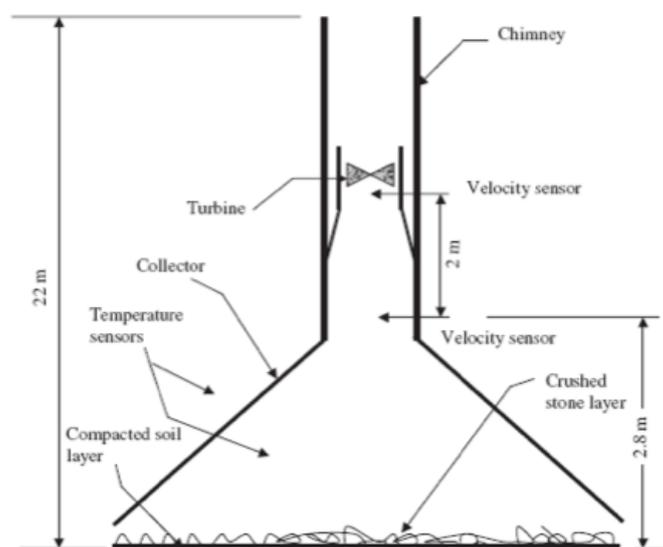


Figura 13. Localização de alguns dos sensores no protótipo de Botswana (KETLOGETSWE ET AL. , 2008, pg 05)

Alguns dos elementos mensurados foram a velocidade do ar, a temperatura e a irradiação solar. A partir desses elementos, alguns parâmetros foram estudados, como energia solar difusa, global e a percentagem de albedo. Os resultados obtidos serviram de base para um estudo detalhado do funcionamento do modelo naquele determinado local. Foram produzidos gráficos de análise dos fatores acima citados e puderam ser determinados os valores máximos de temperatura, variação da velocidade do ar, as horas de funcionamento em potência máxima e a quantidade de MW produzidos nas diferentes épocas do ano (**Gráfico 03**).

Resultados de 19 a 30 de outubro e de 14 a 21 de novembro

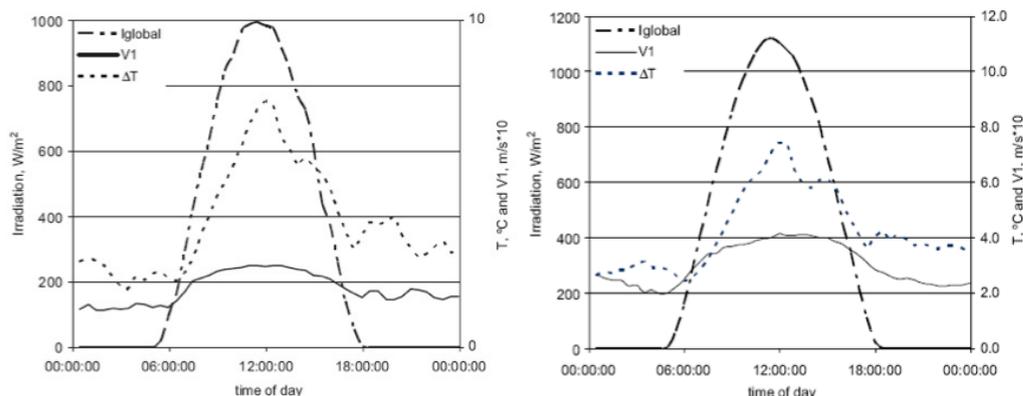


Gráfico 03. Gráficos de insolação, temperatura e velocidade do vento no protótipo de Botswana (KETLOGETSWE ET AL., 2008, pg 07)

Em 2008, o governo da Namíbia aprovou a proposta de construção da Usina Chaminé Solar denominada *Greentower* (Torre Verde). A torre foi planejada para gerar 400 MW de potência, e possui 1.500 m de extensão e 280m de diâmetro. Seu coletor consiste de uma estufa de 37.000.000 m² de área.

Atualmente, na Região Autônoma da Mongólia, China, se encontra o único protótipo em construção (**Figura 14**). Foi desenvolvido pela Universidade de Ciência e Tecnologia da Mongólia, juntamente com a Universidade Técnica de Madri, Espanha. Localizado no Deserto de Wuhai, o projeto possui um coletor oval de 6.170 m², com uma torre de 53 m de altura e 18 m de diâmetro e tem potência de 200 KW.

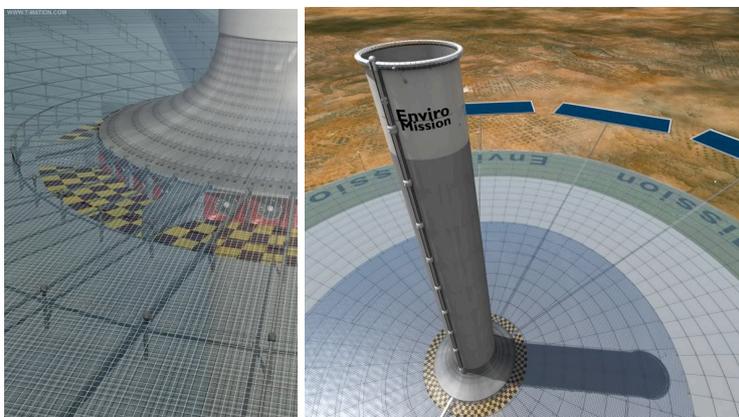


Figura 14. Representação da Chaminé Solar em 2012. (SCHLAICH, 1995, pg 16).

Segundo o Ministério de Ciência e Tecnologia do Governo Chinês (2010), órgão de apoio ao estudo, a obra foi pensada em três etapas, a primeira, concluída em dezembro de 2010, teve início em maio de 2009 e serviu para a construção de uma chaminé de demonstração do protótipo, custou aproximadamente 240 milhões de reais.

Para Shasha (2010) a segunda fase começou em fevereiro de 2011, com previsão de acabar até o final do ano. A meta é a conclusão de uma usina funcionando com 2,2 MW de potência através da Chaminé Solar. Esse sistema ocupará 220.000 m², com um investimento estimado de cerca de 264 milhões de reais. A última etapa está prevista para o início de 2012 e final de 2013, com custo aproximado de 3,03 bilhões de reais. Ao final, o projeto produzirá 25,1 MW de potência e o coletor ocupará 2510.000 m².

No entanto, nos Estados Unidos se encontra o estudo de viabilidade mais recente (**Figuras 15 e 16**). Proposta pela empresa EnviroMission, uma usina em Quartzsite, Arizona, possui uma chaminé de 792 metros de altura e previsão de conclusão da obra em 2015. O projeto estima uma produção de 200 MW e irá custar aproximadamente 1,795 bilhão de reais. Segundo a Enviromission (2013), a Chaminé Solar irá abastecer aproximadamente 150.000 casas, com mais de 1 milhão MW/h.



Figuras 15 e 16. Representação da Chaminé Solar no Arizona. (ENVIROMISSION, 2012).

Strobel (2012) em sua tese de doutorado faz análise da energia gerada por uma Chaminé Solar no território brasileiro. Para ele muitos autores na literatura realizam simulações envolvendo torres muito elevadas, na ordem de 1000 a 1500 metros. No entanto, afirma que as empresas que estão neste ramo estão reduzindo a altura de suas chaminés para o patamar de 250 a 500 metros, por motivos de

tecnologia de construção. Torres muito elevadas são um risco do ponto de vista da engenharia, pois a construção se torna cara e perigosa, o que pode colocar em risco o investimento. Em seu estudo, o autor define a altura da planta em 500 metros.

Strobel (2012) ainda considera um diâmetro do coletor (superfície vítrea) de 1000 m, além do diâmetro da chaminé mantido a 5% do diâmetro do coletor, como em Manzanares e em diversos outros estudos na literatura. Além disso, sua proposta acrescenta uso paralelo de módulos fotovoltaicos a fim de melhorar a geração de energia, avaliando a sensibilidade de fatores como qualidade do material vítreo e disposição dos módulos fotovoltaicos na planta da central.

Dessa forma, podemos perceber que a tecnologia das Chaminés Solares é um tema atual, com vários estudos em diferentes partes do mundo. E ainda que se trata do uso de uma fonte de energia moderna e limpa, que possibilita o uso da área logo abaixo do coletor de diferentes formas, seja com plantações em áreas rurais, ou parques em áreas urbanas. O sistema ainda se encontra em análise, e deve ser pensado para cada região, de forma a aumentar a eficiência do sistema energético e viabilizar sua implantação de acordo com as especificidades locais.

3.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Aqui são apresentados os aspectos de construção de uma Chaminé Solar. Assim, descritos os componentes que constituem o coletor, a torre da chaminé e as turbinas do sistema. Os autores estudados são Schlaich (1995) e (2002), Neves (2005) e Bonelle et al. (2010).

A Chaminé Solar possui três elementos essenciais: o coletor, a chaminé e as turbinas de vento (**Figura 17**).

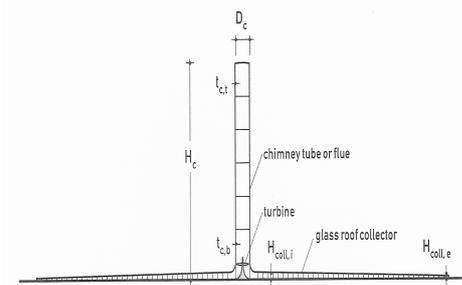


Figura 17. Corte da Chaminé Solar (SCHLAICH, 1995, pg 14).

O coletor é composto de uma superfície transparente e plana. O material utilizado por Schlaich no protótipo de Manzanares foi o vidro. No entanto, alguns estudos atuais sugerem o uso de material plástico, como película de policarbonato. A **Figura 18** apresenta o detalhamento dos aspectos construtivos do coletor. Uma estrutura metálica, modular (2m a 6m de altura) sustenta a estufa, e permite a passagem do ar em seu interior. Segundo Schlaich, (2002) a altura do coletor aumenta a medida que se aproxima da torre, de modo que o ar seja desviado para o movimento ascendente, com perda mínima da energia por fricção.

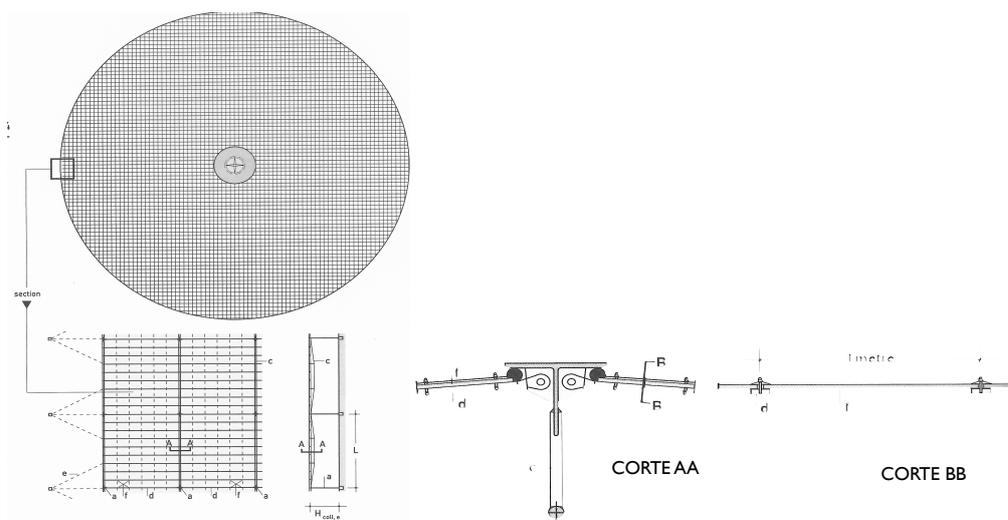


Figura 18. Detalhamento do coletor (SCHLAICH, 1995, pg 14).

O coletor de vidro de 4mm pode ser de camada simples ou dupla. O que importa é a cobertura permitir a passagem do comprimento de onda curto e, após seu contato com o solo aquecido, reter a radiação solar com o comprimento de onda longo.

Assim, o terreno sob o coletor se aquece e conseqüentemente transfere calor para o ar que flui de forma radial para o interior da chaminé (**Figura 19**).

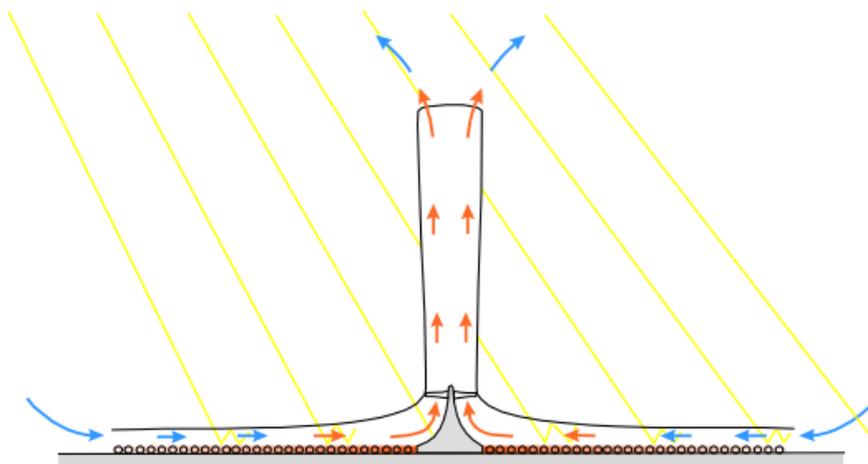


Figura 19. Movimento ascendente do ar no funcionamento da Chaminé. (SCHLAICH, 2002 pg. 4).

O vidro (ou outro material transparente) deve ser apoiado em uma estrutura de aço ou concreto pré-fabricado. A estrutura modular forma uma treliça, apoiada a cada 9m por uma fundação de concreto, um bloco em cada extremidade.

A cada metro barras de aço laminado plano se apoiam na estrutura acima descrita (**corte BB**). O caimento dessas barras é direcionado para as extremidades, ou seja para a borda exterior do módulo de 9m (**corte AA**), formando assim a treliça.

Segundo Schlaich (2002), no solo abaixo do coletor existem tubos na cor preta, cheios de água, fixados um ao lado do outro. Os tubos são hermeticamente fechados, pois não deve haver espaço para a evaporação. O volume de água no interior dos tubos é delimitado de acordo com as características da chaminé e principalmente da potência de saída desejada. Logo, o volume de água deve corresponder a uma camada de 5 cm a 20 cm de altura.

O **Gráfico 04** apresenta a diferença de energia armazenada pelo solo e pelos tubos com água. A transferência de calor do solo possui pico ao meio dia, já os tubos apresentam linhas constantes.

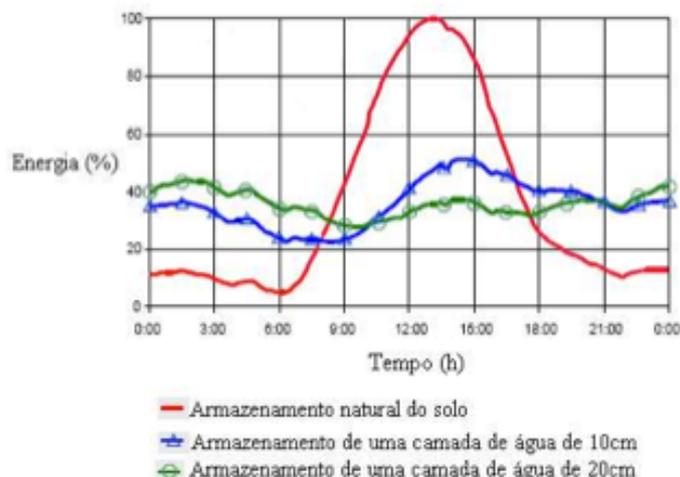


Gráfico 04. O armazenamento de calor pelo solo e pelos tubos de água. (NEVES, 2005 pg. 66).

Portanto, a transferência de calor entre os tubos e a água é muito maior do que entre a superfície do solo e as camadas mais profundas do solo. Isso acontece mesmo com a baixa velocidade do fluxo de água no interior dos tubos, uma vez que a capacidade térmica da água (4,2 kJ/kg) é muito mais elevada do que a do solo (0,75-0,85 kJ/kg).

Dessa forma, a água no interior dos tubos armazena uma parte do calor solar e o libera durante a noite, quando o ar no interior do coletor arrefece, devido a diferença de temperatura externa.

Segundo Neves (2005), apenas 25% da área abaixo do coletor deve ser preenchida pelos tubos. Para o autor, em função da energia que se pretende gerar durante a noite, os tubos devem ser dispostos preferencialmente junto à chaminé, pois nesse local se absorve a maior parte da radiação pelo coletor e, também, porque desta forma, se minimiza a perda do calor pela circulação do ar dentro do coletor.

O próximo elemento constituinte da tecnologia é a Chaminé. Para Schlaich (2002), a torre funciona como o motor térmico da usina solar. Trata-se de um tubo de concreto e aço que funciona devido a diferença de pressão. Assim é um tubo de pressão com perda por atrito reduzida, devido a sua proporção de superfície e volume. Funciona como um tubo de pressão hidroelétrica ou um conduto forçado, logo o impulso ascendente do ar aquecido no coletor é proporcional ao aumento da temperatura do ar no coletor (ΔT_{col}) e seu volume: altura da chaminé (H_c) multiplicado pelo diâmetro da chaminé (D_c).

Segundo Schlaich (2002), em uma Chaminé Solar, o coletor aumenta a temperatura do ar até cerca de 35° C. Isto produz uma velocidade de ascensão do ar de aproximadamente 15 m/s. Assim, é possível caminhar na base da chaminé e realizar sua manutenção.

A base da Chaminé consiste na área de transição entre o coletor e a torre. O material escolhido para sua estrutura é o concreto, pois, hermeticamente fechado, suporta a combustão. Assim o fechamento é feito em concreto ou folhas de vidro ondulado, apoiadas em uma estrutura circular. A estrutura da base, então, consiste em pilares com fundação radial. O seu fechamento faz a transição do final do coletor para a torre (**Figura 20**).

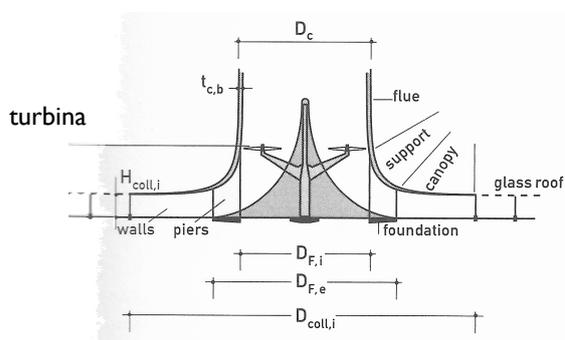


Figura 20. A base da Chaminé. (SCHLAICH, 1995 pg. 15).

A chaminé consiste em um cilindro oco de aço. Algumas propostas foram feitas em concreto armado, sem tirantes e outras em chapas de metal ondulado e estrutura tensionada com cabos de aço. Segundo Bonelle et al. (2010), existem também projetos com membranas de material plástico.

Segundo Schlaich (2002), dentro da torre, as turbinas fazem o movimento de rotação devido ao fluxo do ar, e o transformam em energia mecânica. Em seguida, geradores comuns transformam a energia mecânica em energia elétrica.

O autor afirma que a lâmina da turbina deve ser ajustada de forma a se obter o rendimento máximo da Chaminé. Assim, a lâmina deve ser regulada durante a operação de saída de energia, de acordo com a velocidade do ar, o que altera o fluxo de ar dentro da torre.

De acordo com o protótipo de Manzanares, se os lados planos das lâminas são perpendiculares ao fluxo de ar (**Figura 21**), a turbina não liga. Se as lâminas se localizarem paralelamente ao escoamento de ar e permitir que o ar flua através desta (**Figura 22**), não há perda de pressão na turbina e a electricidade é gerada. Logo, entre estes dois extremos existe uma configuração de lâmina ideal: a potência de

saída é maximizada quando a queda de pressão na turbina ocorre com de cerca de dois terços da diferença de pressão total disponível.

Segundo Neves (2005), a potência final da Chaminé Solar é definida por uma sequência de equações, e depende das condições meteorológicas do local e das características da própria central (altura e diâmetro da chaminé e o diâmetro do coletor). Uma Chaminé Solar é única devido ao local de implantação, as características do solo e do ar, desempenho das turbinas, controle de operação, armazenagem e transferência de calor, entre outros fatores que podem ser descritos por modelos avançados de termodinâmica e dinâmica dos fluidos em modelos computacionais.

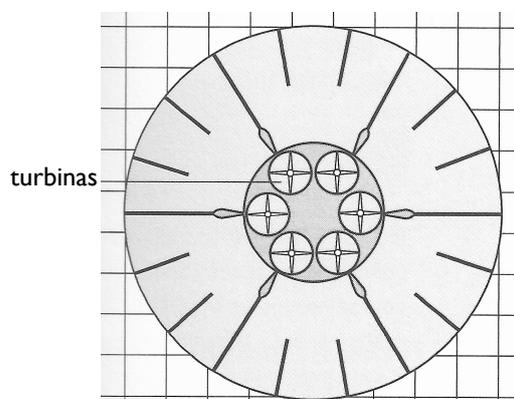


Figura 21. Corte esquemático da torre com turbinas perpendiculares ao fluxo de ar. (SCHLAICH, 1995 pg. 15).

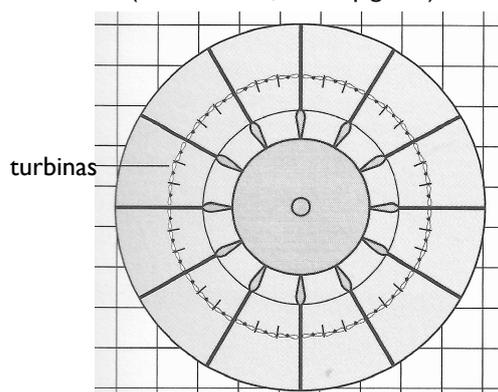


Figura 22. Corte esquemático da torre com turbinas paralelas ao fluxo de ar. (SCHLAICH, 1995 pg. 15).

Para o melhor entendimento da tecnologia, serão apresentadas as equações gerais de funcionamento de uma Chaminé Solar. A potência de saída é definida em

função da sua potência de entrada e as eficiências do coletor (η_{col}), da chaminé (η_{cham}) e das turbinas (η_{turb}). A multiplicação dessas três eficiências resulta na eficiência da central ($\eta_{central}$), que se relaciona diretamente com a potência de saída do sistema segundo a equação:

P = potência de saída ou output elétrico

Q_{solar} = potência de entrada ou input solar

$$P = Q_{solar} \cdot \eta_{col} \cdot \eta_{cham} \cdot \eta_{turb}$$

$$P = Q_{solar} \cdot \eta_{central}$$

Já a potência de entrada (Q_{solar}) se refere a radiação global horizontal (G_h) multiplicada pela área do coletor (A_{col}):

$$Q_{solar} = G_h \cdot A_{col}$$

Nesse sentido, a eficiência do coletor pode ser expressa por duas equações. A primeira delas considera a velocidade do fluxo de ar gerado:

$$\eta_{col} = \frac{Q}{G_h \cdot A_{col}}$$

Em que Q é o ar aquecido ou o output de calor, que se relaciona diretamente com a massa do fluxo de ar (m), o calor específico do ar (c) e a diferença de temperatura entre o ar no início do coletor (ar que entra) e do ar que sai do coletor (entra na chaminé) (ΔT):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$m = \rho_{col} \cdot v_{col} \cdot A$$

Nesse caso, segundo Schlaich (1995), a equação se refere à densidade específica do ar (ρ_{col}) à temperatura no exterior do coletor, ou inicial, somada a variação de temperatura no coletor ($T_0 + \Delta T$). Já a v_{col} seria a velocidade do fluxo de ar na saída do coletor, ou entrada da chaminé. E a área em questão é a área de corte da secção da chaminé. Assim, a eficiência do coletor seria:

$$\eta_{col} = \frac{\rho_{col} \cdot v_{col} \cdot A \cdot c \cdot \Delta T}{G_h \cdot A_{col}}$$

A outra equação que Schlaich (1995) considerou para o cálculo do output de calor, leva em conta os materiais de superfície do local. Os coeficientes α (coeficiente de absorção efetiva do coletor) e β (correção da perda de calor devido a emissão e convecção em $W/m^2 \cdot K$). Dessa forma, pode-se desconsiderar a velocidade do fluxo de ar na saída do coletor.

$$\eta_{col} = \frac{\alpha \cdot A_{col} \cdot G_h - \beta \cdot \Delta T \cdot A_{col}}{\rho_{col} \cdot A \cdot c \cdot \Delta T}$$

Nesse ponto, Neves, 2005 afirma que é importante notar que a altura do coletor possui influência inversa na potência de saída da central. Quanto mais baixo o telhado do coletor, maior sua potência, pois, menor a massa de ar a ser aquecida. Logo, com um telhado mais alto, há uma maior massa de ar dentro do coletor, e assim, maior a possibilidade de perda de calor para o exterior. Além disso, durante a noite, o calor armazenado pelo solo possui um volume maior para dispersar, o que contribui para a redução da potência final.

Segundo o autor, na chaminé, o fluxo do ar aquecido é convertido em energia cinética através da corrente de convecção e em energia potencial devido a perda de pressão na turbina. A diferença de densidade do ar, criada pelo aumento da temperatura no coletor, funciona como força impulsionadora da continuidade do processo. Assim, a diferença de pressão (Δp_{tot}) é criada entre a base da chaminé e o exterior.

Nesse sentido:

$$\Delta p_{\text{tot}} = g \cdot \int_0^{H_{\text{ch}}} (\rho_a - \rho_{\text{cham}}) \cdot dH$$

Em que g é a aceleração da gravidade, H_{ch} a altura da chaminé, ρ_a a densidade do ar no exterior e ρ_{cham} a densidade do ar na chaminé e dH o diferencial de altura da chaminé. Segundo Schlaich (1995), a diferença de pressão pode ser subdividida em pressão estática (Δp_s) e dinâmica (Δp_d).

A primeira ocorre na turbina, e a segunda se refere a energia cinética do fluxo de ar, ignorando as perdas por fricção. É importante ressaltar que quanto maior a altura da Chaminé, maior o Δp_{tot}

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_s + \Delta p_d$$

Segundo Neves (2005), com isso, pode -se estabelecer a eficiência da chaminé:

$$\eta_{\text{cham}} = \frac{P_{\text{tot}}}{Q}$$

Para o autor, a divisão da diferença de pressão nos componentes estático e dinâmico depende da energia tomada pela turbina. Sem a turbina, a velocidade máxima do fluxo de ar ($v_{\text{max, cham}}$) é alcançada e toda a diferença de pressão é utilizada para acelerar o ar e convertê-la em energia cinética:

$$P_{\text{tot}} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot m \cdot v_{\text{max, cham}}^2$$

Em seguida, com a premissa simplificativa de que os perfis da temperatura ocorrem da mesma forma no interior da chaminé como no exterior (ou seja, a diferença mantém-se constante), a velocidade alcançada pela corrente de convecção sem obstáculos pode ser expressa como:

$$v_{\max, \text{cham}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{ch}} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}}$$

Assim:

$$\eta_{\text{cham}} = \frac{g \cdot H_{\text{ch}}}{C_p \cdot T_0}$$

Logo, a eficiência da chaminé possui ligação direta com sua altura. Segundo Schlaich (1995), a velocidade do fluxo de ar e o aumento de temperatura no interior do coletor não possuem influência direta na eficiência total da chaminé. Assim a potência total é expressa por:

$$P_{\text{tot}} = \eta_{\text{cham}} \cdot Q$$

$$P_{\text{tot}} = \frac{g \cdot H_{\text{ch}}}{C_p \cdot T_0} \cdot \rho_{\text{col}} \cdot v \cdot A \cdot c \cdot \Delta T$$

$$\Delta p_{\text{tot}} = \rho_{\text{col}} \cdot g \cdot H_{\text{ch}} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}$$

Finalmente, quanto às turbinas, Schlaich (1995) descreve sua eficiência e influência na potência final da central:

$$\Delta p_s = \Delta p_{\text{tot}} - \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho_{\text{cham}} \cdot v^2$$

Segundo Neves (2005), a equação também se relaciona com a diferença de pressão nos componentes estático e dinâmico já citados, assim, a energia útil da turbina pode ser representada por:

$$P_{\text{turb}} = v \cdot A \cdot \Delta p_s$$

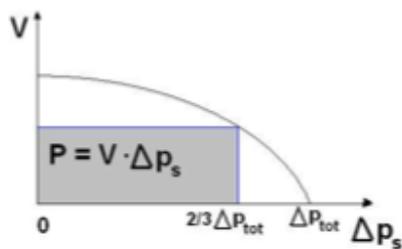
Da mesma forma, o volume do fluxo de ar (V) é:

$$V = v \cdot A$$

Assim:

$$P_{\text{turb}} = V \cdot \Delta p_s$$

Nesse ponto, Schlaich (1995) apresenta um gráfico para relacionar o volume com a diferença de pressão estática no sistema:



Segundo Neves (2005), quando $\Delta p_s = 0$ (curto circuito em analogia eléctrica), não há produção de energia, ou seja, as pás da turbina estão totalmente abertas e o fluxo de ar passa livremente. Já quando $\Delta p_s = \Delta p_{\text{tot}}$, não é produzida carga para o funcionamento, pois as pás da turbina estão totalmente fechadas e não deixam passar o ar. Nesse sentido, a energia da turbina é máxima ($P_{\text{max,tur}}$) quando:

$$v_{\text{pem}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\Delta p_{\text{tot}}}{\rho_{\text{cham}}}$$

Para Neves (2005), a energia máxima da central ou a condição pem no gráfico (ponto de energia máxima) é obtida quando dois terços do total da diferença de pressão são utilizados na turbina. Assim, percebe-se que a energia nesse ponto se

relaciona com a diferença de pressão estática e a velocidade do fluxo de ar de forma indireta. Ou seja, quanto maior a velocidade do fluxo, menor a energia produzida.

Finalmente, a energia mecânica da turbina pode ser expressa por:

$$P_{\max, \text{turb}} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \eta_{\text{col}} \cdot \eta_{\text{cham}} \cdot G_h \cdot A_{\text{col}}$$

$$P_{\max, \text{turb}} = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \eta_{\text{col}} \cdot \underline{g} \cdot H_{\text{cham}} \cdot G_h \cdot A_{\text{col}}$$

$$C_p \cdot T_0$$

Assim, essa equação torna evidente que o output elétrico de uma chaminé solar é proporcional às dimensões da sua estrutura. Dessa forma, variando o volume que existe entre a altura da chaminé e a área do coletor, pode-se chegar a diferentes combinações de altura e área, com o mesmo valor de output elétrico. Logo, não existe uma dimensão ótima para cada componente, e sim um conjunto a ser considerado para cada projeto e seus objetivos específicos.

Nesse sentido, é possível prever um output elétrico de uma Chaminé Solar para a região do Distrito Federal, desde que se proponha dimensões (altura da chaminé e área do coletor) fixas, que seja compatível com nossa escala urbana. Desse modo, pode-se variar as condicionantes climáticas presentes na fórmula, como a incidência de radiação global horizontal (G_h) a qual possui influência direta na potência de saída final do sistema. Ou a potência de saída de calor da chaminé (Q), que se relaciona também de forma direta com a quantidade de calor aquecido no fluxo do ar no interior da chaminé (ΔT).

3.3 CRITÉRIOS DE IMPLANTAÇÃO DA CHAMINÉ SOLAR

Os critérios de implantação de Chaminés Solares são tratados neste item. Nesse sentido, são descritos elementos que influenciam na viabilidade de construção da tecnologia de forma geral. Estes se dividem em critérios ambientais e climáticos (localização) e critérios de construção e dimensão (altura e área). Ambos possuem relação direta com a eficiência final de funcionamento de uma Chaminé Solar. Schlaich (1995) e Neves (2005) foram os autores utilizados.

A localização da Chaminé Solar é um dos fatores mais importantes na aplicação da tecnologia. Segundo Neves (2005), a localização mais adequada para tecnologias solares seria em zonas desérticas. No entanto, devido à necessidade de utilidade dos terrenos urbanos, também pode ser construída em zonas desocupadas, onde exista grande incidência solar anual, ou radiação global^{xii} anual^{xiii} elevada (Figura 23).

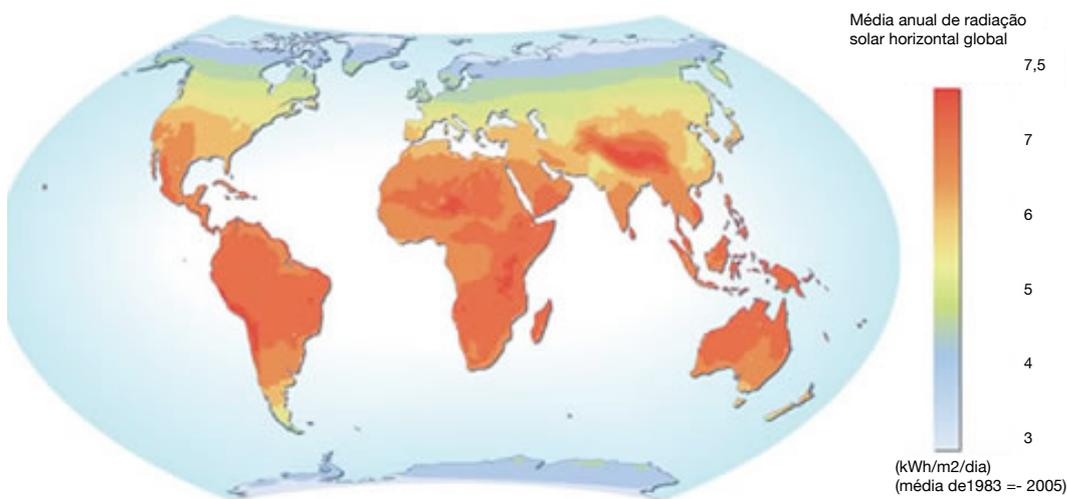


Figura 23. Variação da Radiação Solar Global Anual. (NASA, 2008).

Além da radiação global, Neves (2005) indica que também é fundamental conhecer alguns fatores regionais, como a atividade sísmica, o padrão das chuvas e tempestades e a incidência de chuvas de granizo.

^{xii} Radiação Global é a energia solar que incide sobre uma área (plana ou horizontal) de 1 m². A radiação global é influenciada por fatores como a latitude e a nebulosidade da região. Assim, a Radiação Global Anual é a radiação solar global acumulada ao longo de um ano.

^{xiii} Neves (2005) afirma que a radiação global anual oferece o valor da energia acumulada ao longo de um ano em determinada região. Nesse sentido, existem estudos em locais próximos aos trópicos, como Brasil, Austrália, Estados Unidos, China e África.

Nesse sentido o autor determina que a atividade sísmica deve ser a menor possível, dada a possibilidade de oscilação da torre. O padrão das chuvas têm influência na baixa incidência de raios infravermelhos, assim, muitos dias de chuva significam uma menor produção de energia anual.

O mesmo ocorre com as tempestades. Entretanto, em relação a esse fator, ainda existem questões relacionadas com o efeito das tempestades sobre o solo em que a central está assentada, a intensidade dos ventos que a geram e o desenho da torre. Dessa forma, o ideal para o bom funcionamento da tecnologia seria a ocorrência ocasional de tempestades.

Já com relação às chuvas de granizo, além dos problemas já citados com as tempestades, há a possibilidade de as pedras de granizo afetarem o vidro do coletor. Assim, a ocorrência das chuvas de granizo deve ser um fator relevante na escolha do material de construção no projeto do coletor.

Para Schlaich (1995), além da localização, a capacidade de geração de uma usina de energia solar depende principalmente de dois fatores: o tamanho da área do coletor e a altura da chaminé. Quanto maior a área de coletor, maior o volume de ar aquecido dentro da chaminé.

Nesse sentido áreas grandes como um coletor de 7 km de diâmetro foram considerados. Com relação a chaminé, quanto maior sua altura, maior a diferença de pressão, e conseqüentemente, maior o efeito chaminé. Assim, chaminés de 1000 m de altura estão sendo estudadas. No entanto, segundo Bonelle et al. (2010), há uma proporção ideal para o sistema.

Segundo Neves (2005), a relação entre altura da torre e largura do coletor em uma Chaminé Solar é inversa. Assim, quanto mais alta a torre, menor pode ser o coletor, e vice-versa. O autor afirma que essa questão se relaciona com fatores econômicos do sistema, pois, o custo dos materiais e o seu transporte, irão definir quando será melhor construir uma central “mais alta” ou uma central “mais larga”.

Para Bonnelle (2005), parte da energia gerada pelo sistema é perdida durante o processo em decorrência de vários fatores. Primeiro pelo reflexo da luz direta na sua superfície coletora. Esta reflexão varia de acordo com a quantidade de dioptrias, medida que exprime a capacidade de um meio transparente de modificar o trajeto da luz, e geralmente varia de dois, para camadas simples, a quatro, para camadas duplas. O índice de refração, maior para o vidro do que para o policarbonato (materiais utilizados nos coletores), e o ângulo incidente também variam, influenciando menos ou mais na perda de energia.

Também pela reemissão imediata do calor pelo solo, que seria igual a zero, se a superfície fosse completamente preta, ou 100%, se totalmente fosse totalmente branca, mas costuma ser intermediária, na maioria dos casos. Ocorrem perdas através da condução, dentro do solo, o que a longo prazo diminuiria a eficiência do coletor, ou quando o ar quente do coletor transmite o calor para o material transparente, que em seguida, o passa para o ar livre em seu interior.

Por último, através da reemissão por radiações infra-vermelhas emitidas pelo solo. Quanto mais quente, maior o seu comprimento de onda, e assim, maior a intensidade acumulada. Em estufas, uma grande parte dessa radiação infra-vermelha é absorvida pelo material do coletor, daí a importância em se projetar, sempre que possível, camadas duplas desse material.

Em 2010, ocorreu a segunda conferência internacional sobre a tecnologia das chaminés solares (*International Conference on Solar Chimney Power Technology*), em Bochum, Alemanha. O objetivo era reunir especialistas de todas as diferentes áreas de pesquisa envolvidas no sistema para identificar e atualizar o estado de cada setor de estudo. Foram indicados: a termodinâmica, a mecânica de fluídos, o projeto estrutural, bem como as técnicas de construção, a fim de identificar possibilidades de otimização e economia.

Nesse sentido de redução de custos e otimização do sistema, a chaminé pode ser feita de tecido em vez de aço. Assim, o tempo de vida seria reduzido, mas o custo global seria menor.

Outra alternativa seria substituir a chaminé, no todo ou em parte, por um vórtice. Um tipo de sistema que funciona como furacão em sentido inverso. Qualquer uma destas implementações podem ser construídas rapidamente e, portanto, podem satisfazer necessidades de emergência ou militar.

Ainda um outro desenho sugere um sistema fechado e incorpora um regenerador. A experiência na Espanha sugere que os efeitos de condensação devem ser interessantes tanto sob o coletor, quanto na saída do topo da chaminé. Há ainda um desenho que adiciona vapor de água ao sistema, aumentando o efeito estufa e, em seguida, reciclando a água de volta para o sistema.

Por fim, houve uma discussão sobre a construção de um tubo que subisse uma montanha. Neste caso, a construção pode também ser menos dispendiosa.

Nesse sentido, o sistema proposto para produção de energia é um projeto atual, com problemas a serem discutidos e estudos a serem aplicados, direcionando-os para cada local e clima.

3.4 CUSTOS

O subcapítulo em questão aborda os custos de construção de uma Chaminé Solar. O estudo base para o cálculo estimado dos custos é o de Fluri et al. (2009). Os autores utilizam um parâmetro que não foi considerado em estudos anteriores, os créditos de carbono, ou incentivos fiscais devido ao uso de energia limpa. Estes reduzem significativamente os custos da energia em relação ao custo de implantação de uma chaminé solar.

Dessa forma, apresentam análises de custo baseadas em plantas de escalas, além de considerarem o impacto dos créditos de carbono pela utilização de energia limpa. Segundo Fluri et al. (2009), os resultados obtidos determinam que o custo da energia elétrica proveniente desta fonte é aproximadamente 2,7 vezes maior que o previsto por outros autores, ou seja, passa de 0,327 reais/kWh para 0,882 reais/kWh, considerando a cotação do euro €1,00 = R\$ 3,2664.

Assim, estas discrepâncias se devem tanto ao custo de construção da planta como também da potência prevista a ser gerada anualmente ser menor que o previsto. Isto sugere que as investigações anteriores são muito otimistas e que a implantação deste tipo de planta pode ser arriscada.

No Brasil, Bobek (2010) apresentou um estudo econômico da implantação de chaminés solares no norte do país. O autor testou uma planta de 15 MW de potência nominal. Neste estudo, Bobek (2010) realizou um levantamento do retorno financeiro que a venda de créditos de carbono propicia ao empreendimento, baseado em resoluções do Ministério de Ciências e Tecnologia – MCT.

Este retorno é baseado na multiplicação da produção anual de energia em MWh/ano por um fator de emissão determinado pelo MCT como 0,855 tonCO₂/MWh. O resultado pode ser interpretado como a redução de emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Deste valor, são subtraídos 2% para a UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change – como contribuição para este órgão para promover a diminuição de emissão dos gases de efeito estufa. Os 98% restantes retornam como receita anual ao preço de R\$ 26,1312/tonCO₂.

Segundo Schlaich (1995), a energia elétrica gerada por uma Chaminé Solar é proporcional à área de coletor, conseqüentemente da intensidade de radiação solar global que esse recebe, e à altura da chaminé.

Dimensões ideais pode ser calculadas a partir dos custos de seus componentes específicos (coletor, chaminé e turbinas) para determinados locais. Assim, plantas de diferentes tamanhos são construídos de acordo com o local, mas

sempre a um custo ideal: se o vidro é barato e o concreto caro, então o coletor terá uma área maior, com uma alta proporcional de vidros duplos e uma chaminé relativamente baixa; e se o vidro é caro a área de coletor será menor, e haverá uma chaminé de altura maior.

Segundo Schlaich (1995), a energia solar se torna mais barata a medida que as taxas de juros são baixas e os períodos de amortização mais longos. Logo, os custos (R\$/kWh) para centrais de diferentes capacidades, depende das taxas de juros.

Nesse sentido, o tempo limite superior foi calculado para um período de amortização de 20 anos, o limite inferior para 40 anos. Supondo que temos 12% de juros e 20 anos de amortização, os 200 MW de electricidade da central teriam um custo 0,392 reais/kWh. Quando, por evolução da engenharia tivermos amortizações de 40 anos e as taxas de juro caírem para 6%, a queda dos custos de electricidade cairá para 0,196 reais/kWh, ou seja, a metade dos primeiros custos calculados.

Segundo Bonelle et al. (2010), de acordo com cálculos do modelo, para uma usina Chaminé Solar com potência de 200 MW, seria necessário um coletor de 7 km de diâmetro (área total de cerca de 38 km²) e uma chaminé 1.000 metros de altura.

Dessa forma, o autor afirma que uma estação de energia de 200 MW fornecerá electricidade suficiente para cerca de 200.000 domicílios típicos e vai diminuir mais de 900.000 toneladas de gases de efeito estufa produtoras de entrar no ambiente anualmente. A cerca de 38 km² da área de coleta deverá extrair cerca de 0,5%, ou 5 W/m² de 1 kW/m², da energia solar produzida.

Além disso Schlaich (1995) apresenta tabela de comparação entre o custo aproximado de quatro Chaminés Solares, com radiação solar global incidente no valor de 2300 kWh/m²ano, considerando 1 dólar = 2,39 reais (**Quadro 04**).

Capacidade (MW)	5	30	100	200
Altura da Chaminé (m)	550	750	1000	1000
Diâmetro da Chaminé (m)	45	70	110	120
Diâmetro do Coletor (m)	1250	2850	4300	7000
Custo da Chaminé (reais)	54,37 x 10 ⁶	140,73 x 10 ⁶	448,06 x 10 ⁶	488,27 x 10 ⁶
Custo do Coletor (reais)	28,73 x 10 ⁶	134,99 x 10 ⁶	307,32 x 10 ⁶	749,64 x 10 ⁶
Custo das Turbinas (reais)	22,97 x 10 ⁶	91,91 x 10 ⁶	215,41 x 10 ⁶	382,00 x 10 ⁶
Engenharia, ensaios, outros (reais)	17,23 x 10 ⁶	43,08 x 10 ⁶	114,88 x 10 ⁶	120,63 x 10 ⁶

Capacidade (MW)	5	30	100	200
Custo Total (reais)	123, 5 x 10 ⁶	410,72 x 10 ⁶	1085,69 x 10 ⁶	1740,55 x 10 ⁶

Quadro 4. Tabela de custos, de acordo com a potência e a dimensão da Chaminé Solar.. (adaptado de SCHLAICH, 1995).

Segundo Bernardes (2010), a potência de saída de uma chaminé solar depende de aspectos de projeto, tais como as dimensões da chaminé e do coletor, mas também de parâmetros locais, como as condições ambientais (insolação, temperatura e velocidade do vento)

Assim, o desempenho de uma torre de solar pode ser alterado tanto por eventos naturais tais como ação dos ventos e chuvas. Como por efeitos inerentes ao próprio projeto, como pelo arrasto induzido por contraventamentos utilizados para apoiar a chaminé e por ocorrência de reflexão fora da parte superior do coletor.

3.5 CHAMINÉS SOLARES X CENTRAIS TERMOSSOLARES

O estudo avança agora na comparação de vários sistemas de centrais termossolares para produção de energia. A tecnologia das Chaminés Solares é analisada com relação a custo, produção em larga escala, potência final, retorno de investimento, além de tipo de sistema (concentrador pontual, concentrador em linha e não concentrador). Dessa forma, é possível comparar os tipos de centrais existentes. Percebe-se que cada uma pode ser mais ou menos eficiente em determinada região, conforme as suas características de funcionamento, implantação, bem como custo. Os autores tratados são Neves (2005) e Schlaich (1995).

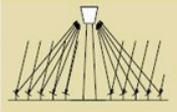
Ao comparar a tecnologia da Chaminé Solar aos outros tipos de Usinas Termossolares, é necessário registrar que, ao contrário das Usinas por Concentradores Parabólicos, que foram testadas várias vezes e construídas em grande escala, a Chaminé Solar (CSPP) não é considerada uma tecnologia comprovada, o que pode afastar investidores.

O principal motivo seria o custo de um projeto em larga escala, considerado caro demais para um sistema de seu tipo, sendo que as plantas em pequena escala podem não ser consideradas rentáveis. Assim, se faz essencial o estudo da tecnologia em diferentes ambientes, bem como a construção de protótipos a fim de extinguir dúvidas sobre sua função e viabilidade, visto que a médio e longo prazo, o custo de funcionamento e manutenção da tecnologia seria muito baixo.

A Chaminé Solar possui taxa de conversão de energia consideravelmente mais baixa do que outros projetos do mesmo grupo de coletores solares térmicos de altas temperatura. No entanto, essa deficiência é equilibrada, até certo ponto, pelo baixo custo de investimento por metro quadrado de armazenamento de energia solar.

Nesse contexto, propõe-se fazer comparação entre as Chaminés Solares e as usinas térmicas solares mais desenvolvidas: Usinas de Concentradores Solares por Heliostatos (CSPs).

Atualmente, no grupo das energias solares, existem três tipos de usinas termossolares. Assim sendo, foi elaborado quadro comparativo em que as seguintes categorias foram avaliadas: tipo de sistema, temperatura necessária para seu funcionamento, potência média esperada, desvantagens e, por fim, vantagens da tecnologia em questão. Além disso, desenhos esquemáticos foram destacados para melhor diferenciar cada tipo de usina (**Quadro 05**).

CENTRAIS TERMOSSOLARES						
concentradores pontuais		concentradores em linha		não concentradores		
sistema de pratos	usina de receptor central	usina de coletores parabólicos		chaminés solares		
alta temperatura	média temperatura	média temperatura	baixa temperatura			
						
10 MW <u>máx</u>	25 MW <u>máx</u>	80 MW <u>máx</u>	200 MW <u>máx</u>			
não comercial	não há produção em massa	uso de óleo restringe temperatura de operação a 398°C	não há produção em massa			
armazenagem em altas temperaturas	alta eficiência	baixo custo dos materiais utilizados	<u>revitalização</u> do solo abaixo do coletor			
						

Quadro 05. Quadro comparativo entre os tipos de usinas termossolares existentes.

Nesse sentido, os concentradores pontuais se dividem em Sistema de Pratos e Usina de Receptor Central por Heliostatos (CSP). Ambos concentram a radiação solar com o uso de heliostatos (espelhos) para um ponto no alto da torre, em seguida, o fluido (água) ali aquecido é conduzido para um sistema de alimentação de energia convencional.

Nos concentradores em linha, ou Sistemas Parabólicos, a radiação solar é concentrada ao longo de um eixo (como em painéis solares convencionais) para um tubo receptor e o fluido (água) aquecido também é conduzido para uma estação de energia convencional. Esta é atualmente a variante de maior aceitação.

Nesse caso, Neves (2005) registra que a calha parabólica e o receptor do sistema central são construídos com uso de tecnologia avançada, pois aproveitam somente a radiação direta e necessitam de alto consumo água de refrigeração para funcionarem, o que eleva o custo final da energia produzida.

O terceiro tipo, a Chaminé Solar é um sistema não concentrador, conforme destaca Schlaich (1995). Nessa tecnologia o movimento ascendente do ar aquecido força a passagem do ar pela chaminé, localizada no centro de uma estufa. Nesse caso, a água de resfriamento não é necessária para a operação. Os materiais constituintes, diferentemente da CSP, são o concreto para a torre e o vidro para o telhado do coletor

Assim, pode-se perceber que a Chaminé Solar possui algumas vantagens e especificidades com relação aos outros tipos de Usinas. Primeiro, não necessita de água em seu funcionamento, o que permite a sua aplicação em regiões desérticas, com alta incidência de radiação solar. Ademais, não têm a necessidade de uso de tecnologia avançada para sua construção, bem como de mão de obra especializada. Por fim, embora o coletor ocupe grande área em relação à potência final, há a possibilidade de uso dessa área logo abaixo do coletor, visto que o solo se torna fértil e o calor permanece suportável.

3.6 CHAMINÉS SOLARES X OUTRAS FONTES

Da avaliação realizada no tópico anterior avança-se para análise comparativa entre a Chaminé Solar (fonte termosolar) e outros tipos de Usinas (fontes eólica, hídrica e termoelétrica). Para tanto, são descritas características em comum de cada tipo, de forma a analisar suas vantagens e desvantagens de implantação. Os autores relacionados são Schlaich (1995) e (2002) e Neves (2005).

Dessa forma, a Chaminé Solar também pode ser comparada a outros tipos de fontes de energia, como a hidrelétrica, eólica, e combustíveis fósseis. Foi elaborado quadro comparativo referente a alguns atributos das tecnologias de geração de energia atuais.

Assim, o quadro relaciona a fonte com o tipo de Usina, sua área total de ocupação em km², o custo em reais e a potência elétrica final do sistema em questão. Para cada exemplo foram escolhidas Usinas padrão, relacionadas nas figuras ao final do quadro. Essa escolha se deu de forma qualitativa. Nesse sentido, a principal característica determinante foi a escala da Usina padrão utilizada como exemplo, visto que esta característica era determinante para a maior eficiência e clareza de comparação e análise (**Quadro 06**).

FONTE	<u>termosolar</u>	eólica	hídrica	<u>termoelétrica</u>
TIPO	chaminé solar	turbina eólica eixo horizontal	usina hidrelétrica	gás natural
ÁREA	21 km ²	130 Km ²	1.350 Km ²	2.500 Km ²
CUSTO	847 milhões	670 milhões	17,4 bilhões	750 milhões
POTÊNCIA	200 MW	51 MW	14.000 MW	780 MW

			
Deserto Novo Gales, Austrália (2015)	Osório, Brasil (2006)	Itaipú, Brasil/Paraguai (1984)	UTE Norte Fluminense, Brasil (2004)

Quadro 06. Quadro comparativo entre as fontes de geração de energia.

Nas usinas hidrelétricas a energia potencial da água pode ser convertida em energia mecânica que posteriormente pode ser convertida em energia elétrica. Segundo Schlaich (1995), Chaminés Solares são tecnicamente similares a hidrelétricas. Assim como a água, o sol seria a fonte de energia que esquento o ar, que em seguida a energia potencial do ar quente em ascensão pode ser convertida em energia mecânica, que posteriormente pode ser convertida em energia elétrica.

Pode-se comparar o telhado coletor ao reservatório de água e o efeito chaminé ao conduto forçado. Além disso, o coletor e o reservatório necessitam de áreas de implantação comparáveis em tamanho para a mesma saída de potência elétrica. No entanto, o coletor pode ser construído em desertos áridos e sua manutenção ocorre sem qualquer dificuldade, enquanto solo útil e algumas vezes ocupado, é submerso em reservatórios.

Ambos sistemas de geração de energia trabalham com mudança de pressão e o uso de turbinas. Assim como atingem custos de produção de baixa potência, devido a vida útil longa e o baixo custo de operação. No entanto, enquanto uma hidrelétrica pode abastecer uma área maior e servir de fonte primária, a Chaminé Solar seria projetada para trabalhar concomitantemente com a usina hidrelétrica, ou, ainda, abastecer pequenas regiões em que ainda não há energia elétrica.

Para Neves (2005) outra vantagem é que Chaminés Solares podem ser projetadas em lugares com clima de baixa umidade, pois operam em ar seco e podem funcionar sem a corrosão e cavitação normalmente causadas por água. Além disso, ao contrário de outras tecnologias solares, a CSPP não precisa de água para refrigeração, o que é muito importante em zonas desérticas onde a água, quando existe, é escassa.

Já comparada com a energia eólica, as turbinas da Chaminé não possuem o mesmo tipo de funcionamento das turbinas horizontais eólicas. Estas funcionam por etapas e com velocidades de vento específicas, aquelas, devido a diferença de pressão. Logo, funcionam como um túnel de pressão com um turbogerador de vento, em que, de forma semelhante a uma estação de energia hidroelétrica, a pressão estática é convertida em energia de rotação usando uma turbina instalada em um tubo oco.

Segundo Schlaich (2002) a potência de saída de um túnel de pressão deste tipo é cerca de oito vezes maior do que a de uma turbina de velocidade escalonada (eólica), ao ar livre, com o mesmo diâmetro.

Essa é uma diferença no funcionamento da Chaminé Solar: a velocidade do ar antes e depois da passagem pela turbina é praticamente a mesma. Nesse sentido, a velocidade de saída do ar obtida é proporcional ao produto do fluxo de volume e a queda de pressão na turbina.

Assim, Schlaich (2002) afirma que para um rendimento máximo de energia, a fim de maximizar o sistema de regulação da turbina, o produto volume de ar e pressão na turbina deve ser o maior possível, em todas as etapas de seu funcionamento segundo a equação

É importante ressaltar, portanto, que a chaminé de uma central solar funciona com ar a baixa velocidade e somente um pouco mais quente que o ar atmosférico. Segundo Neves (2005), os cálculos indicam que há diferença de 10° celsius entre as temperaturas do ar de uma chaminé de 1 000 m e do ar exterior. O autor afirma que assim, não há perigo da existência de gases corrosivos que a danifiquem. A chaminé deve ser construída apenas com as preocupações de escoar o maior fluxo de ar possível e de a resistência mecânica ser adequada para suportar as ações da natureza durante o seu período de vida útil.

Além disso, é preciso levar em conta a energia “produzida” pelos tubos negros, como outra diferença com relação às centrais eólicas. Segundo Neves (2005), assumindo que, durante o verão, dados demonstram que a Chaminé Solar de Manzanares produziu em média 180 MW (devido aos dias de chuva ou nublados) e que no inverno este valor foi de 50 MW (considerando que o inverno na região dura de maio a setembro), o valor global de potência seria de cerca de 1 100 GWh, o que representa uma disponibilidade da central de cerca de 62,8%. Já os parques eólicos apresentam disponibilidade próxima dos 30%, o que resulta em menos do dobro da disponibilidade de energia final.

Segundo Neves (2005), com condições meteorológicas adequadas, e recorrendo aos tubos negros, as Chaminés Solares podem funcionar 24 horas por dia, produzindo quase a mesma quantidade de energia. Para o autor, à rigor, produzem mais energia durante o dia, contudo, nesse período o consumo também é mais elevado.

Dessa forma, o autor afirma que centrais deste tipo podem ser construídas para fornecer energia para regiões remotas, funcionando como centrais autônomas. Elas seriam úteis também no caso de regiões urbanas desocupadas abastecidas de rede elétrica ao serem conectadas de forma direta à rede de distribuição. Logo, podem aumentar a energia disponível total na rede e ajudar na sua estabilidade.

Neves (2005), ainda discorre que, sempre que sua produção de energia for estável, o que ocorre durante os dias de céu limpo, as CSPP podem fornecer energia à rede de forma contínua, funcionando como centrais de base, o que é útil para os períodos de consumo de energia regulares. Nesse sentido, as barragens hidroelétricas seriam chamadas para responder aos períodos de pico de consumo.

Por fim, Schlaich (2002) afirma que o investimento necessário para a construção de uma Chaminé Solar é maior do que o custo de termoeletricas alimentadas a recursos fósseis, como o gás natural. Entretanto, os custos de exploração da Chaminé Solar são consideravelmente mais baixos, porque não existem gastos com combustível (radiação solar). Dessa forma, a energia solar se torna mais barata a medida que as taxas de juros são baixas e os períodos de amortização mais longos.

A Chaminé Solar, portanto, pode ser uma das alternativas para a substituição de fontes fósseis de geração de energia no país. Por isso, é importante a comparação com outros tipos de fontes de energia limpa, de maneira a se entender suas características, além de suas vantagens e desvantagens em relação a cada contexto local. Logo, é possível o estudo e planejamento do setor elétrico, com a proposição de matriz energética funcional, totalmente limpa e diversificada.

4 A EFICIÊNCIA DA CHAMINÉ SOLAR NO CONTEXTO CLIMÁTICO DO DISTRITO FEDERAL

4.1 FATORES REGIONAIS QUE INFLUENCIAM A IMPLANTAÇÃO

Para avaliação dos fatores locais que influenciam a implantação da Chaminé Solar são apresentados os elementos direcionados ao território brasileiro. Dentre eles são analisados em especial os dados climáticos gerais, como radiação solar, nebulosidade, vegetação e incidência de ventos. Para tanto, são utilizados mapas da base de dados do programa SWERA (programa internacional de promoção de energias renováveis em países em desenvolvimento), do Mapa Solarimétrico Brasileiro, do IBGE, do Laboratório de Eficiência Energética da Universidade de Santa Catarina (LABEE), bem como do INMET. Os mapas são organizados de acordo com as características necessárias para a eficiência da Chaminé Solar. De Strobel (2012) utilizamos o cálculo de potência estimada de uma Chaminé Solar por região do território Brasileiro em forma de tabelas que registram quantos habitantes seriam beneficiados com esse tipo de central elétrica. É apresentado o cálculo estimado da potência de saída elétrica final de uma Chaminé Solar para o DF segundo os dados de Schlaich (1995). Outros autores utilizados para tratar dos conceitos são: Neves (2005), Romero (2000), Martins et al (2008), bem como dados do INMET (2011), IBGE (2013), Pereira et al. (2006), Strobel (2012).

A localização adequada da Chaminé Solar possui influência direta na sua energia potencial final. Além disso, a localização adequada pode diminuir os custos tanto de manutenção quanto de instalação. O local ideal são as zonas desérticas, devido à menor utilização do terreno. No entanto, Neves (2005) afirma que a tecnologia pode ser desenvolvida em locais desocupados que apresentem radiação solar global anual ($W/m^2 \cdot ano$), desde que a instalação não se oponha ao uso da terra.

Para Romero (2000), fatores climáticos globais são aqueles que condicionam, determinam e dão origem ao clima local, nesse sentido a radiação solar é um deles. A autora afirma que a radiação solar é a energia transmitida pelo sol sob a forma de ondas magnéticas. Já a radiação solar global anual que é a que incide sobre uma área de $1 m^2$, e se refere ao total de energia solar acumulada ao longo do ano em determinada região.

Segundo Pereira et al. (2006), as médias anuais de irradiação solar diária incidente em qualquer região do Brasil ($1500 a 2500 kWh/m^2$) são maiores do que as da maioria dos países europeus, como Alemanha ($900 a 1250 kWh/m^2$), França ($900 a 1650 kWh / m^2$) e Espanha ($1200 a 1850 kWh/m^2$) onde os projetos para aproveitar os recursos solares são muito difundidos, alguns com grandes incentivos do governo.

Para os autores, a radiação solar pode ser medida horizontalmente ao plano terrestre, ou sob o plano inclinado. A **Figura 24** traz o mapa da radiação solar no Brasil medida sobre um plano com inclinação igual a latitude do pixel em consideração. Assim, não leva em conta a topografia local. Essa configuração é a que possibilita a máxima captação da energia solar incidente.

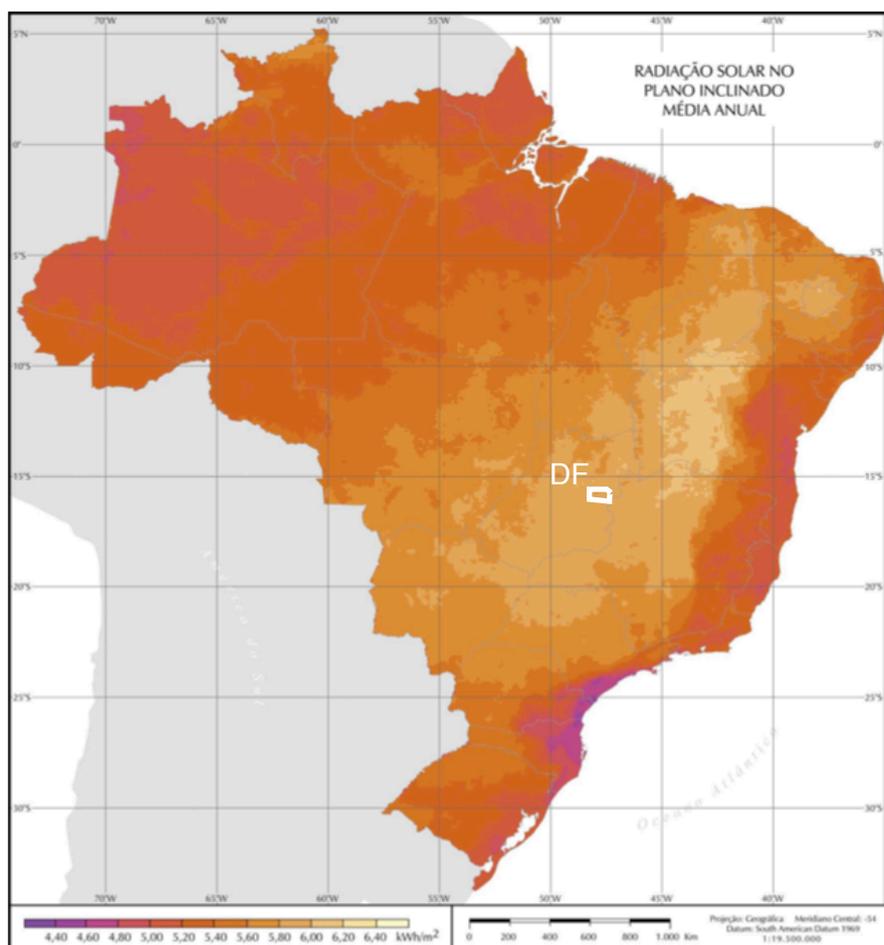


Figura 24. Mapa de radiação solar média anual no Brasil, medida no plano inclinado (PEREIRA ET AL.,2006, pg 35)

Para Pereira et al. (2006) a irradiação solar sobre o plano inclinado apresenta forte influência no albedo de superfície. Os maiores níveis de irradiação no plano inclinado ocorrem na faixa que vai do Nordeste ao Sudeste durante a primavera e os menores valores em todas as regiões do Brasil ocorrem durante os meses de inverno.

Já a **Figura 25** representa o mapa de radiação solar horizontal no Brasil. Este possui menor variação na escala de cores, ou seja, é mais homogêneo e demonstra espacialmente a medida de radiação horizontal incidente no território brasileiro.

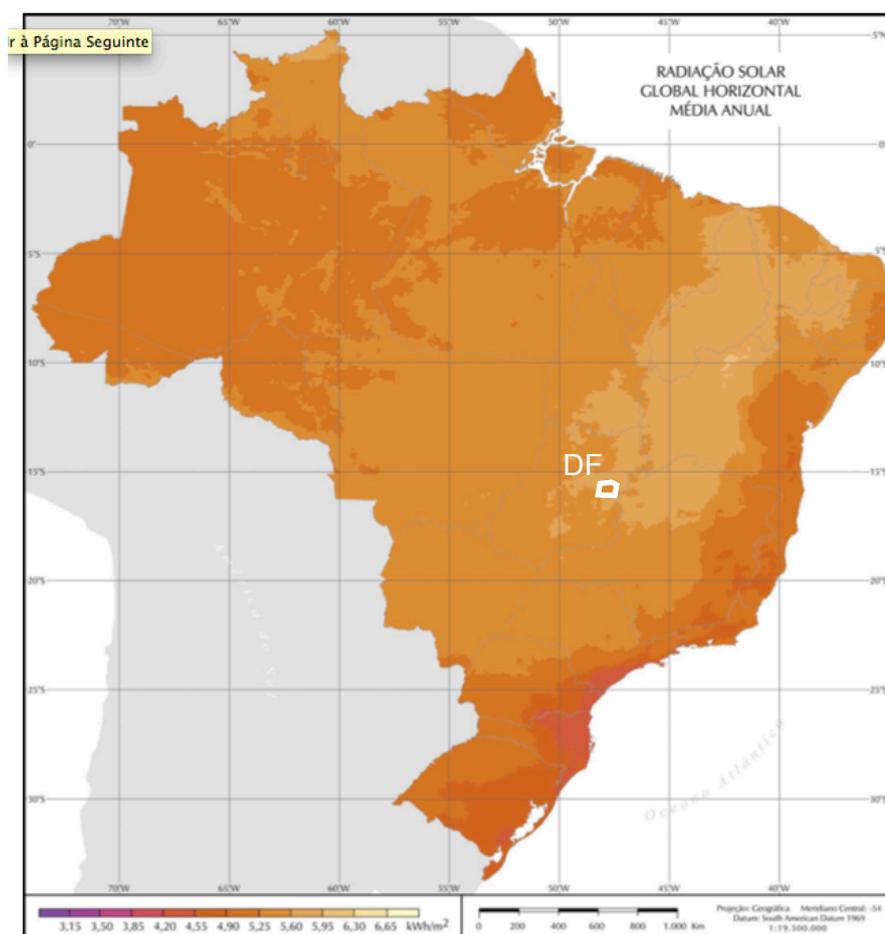


Figura 25. Mapa de radiação solar média anual horizontal no Brasil (PEREIRA ET AL., 2006 pg 35).

Segundo Martins et al. (2008), o mapa de variabilidade sazonal apresentado na **Figura 26** é em sua maioria homogêneo. Nesse sentido, apesar das diferentes características climáticas e ambientais do território brasileiro, pode-se observar que a radiação global é bastante uniforme.

Para os autores as regiões centrais possuem a menor variabilidade sazonal de radiação e temperatura. Assim as regiões ao Norte, do Cerrado, a região semi-árida do Nordeste e a parte ocidental da região Sudeste apresentam as maiores médias anuais e sazonais de radiação solar global diária no Brasil. Dessa forma são mais apropriadas para a implantação da tecnologia.

Já a região Norte recebe menor incidência de radiação solar durante o verão se comparada à região Sul, apesar de sua localização próxima à linha do Equador. Durante meses de Inverno os autores afirmam que, ocorre o inverso, e a região amazônica recebe maior irradiação solar global. Isso se deve às características climáticas da região amazônica que apresenta fração de cobertura de nuvens e

precipitação elevadas durante o verão devido à forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Nesse sentido, Martins et al. (2008) afirmam que o deslocamento da ZCIT associado à incursão dos ventos Alísios provenientes do Oceano Atlântico é responsável por altas taxas de precipitação (cerca de 1100mm) no noroeste da região Amazônica, mesmo durante o período de estiagem entre julho e setembro. Em razão disso, o oeste do estado do Amazonas apresenta as menores irradiações solares da região Norte do Brasil durante todo o ano.

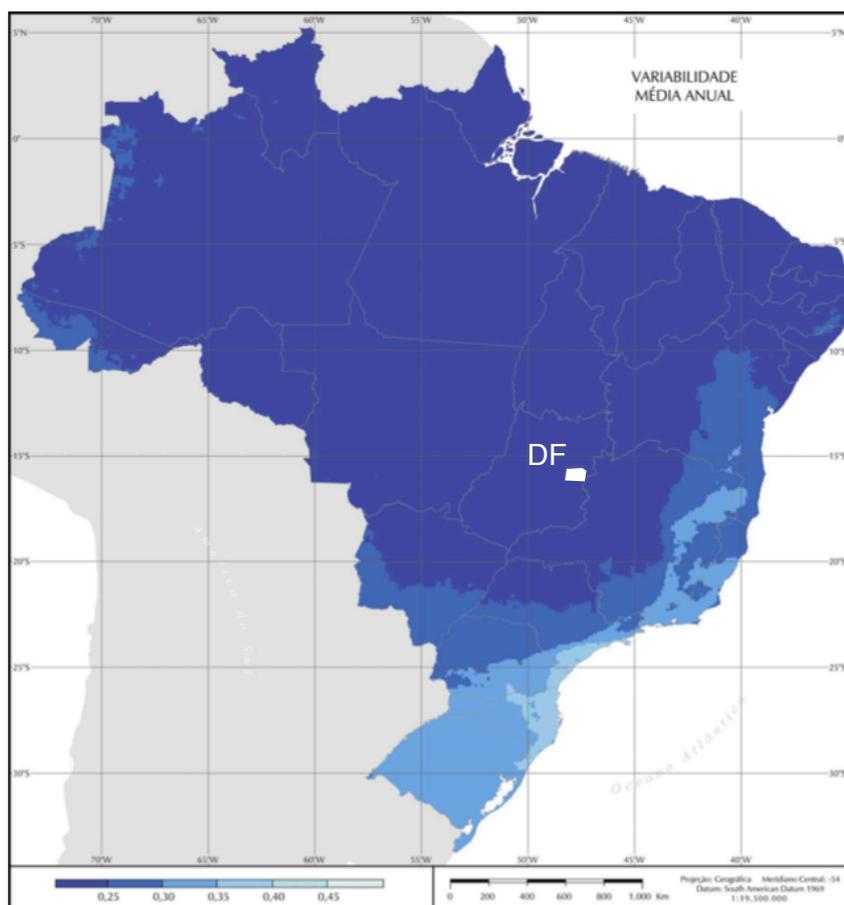


Figura 26. Mapa de variabilidade anual média de insolação no Brasil (PEREIRA ET AL., 2006 pg 46).

Para Martins et al. (2008), a incursão dos ventos Alísios também explica a menor irradiação solar no litoral e região costeira do Nordeste Brasileiro. Os valores máximos de irradiação solar são observados a oeste da região Nordeste, incluindo parcialmente o norte de Minas Gerais, o nordeste de Goiás e o sul de Tocantins. Durante todo o ano, a influência da Alta Tropical, que está associada ao Anticiclone

Tropical do Atlântico Sul, confere regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar para essa região semi-árida.

Já a região Sul, para os autores, apresenta maiores variações inter-sazonais. A irradiação solar global apresenta o menor valor do Brasil nessa região, notadamente na costa norte do estado de Santa Catarina, litoral do Paraná e litoral sul de São Paulo. As características de clima temperado dessa região e a influência de sistemas frontais associados ao Anticiclone Polar Antártico contribuem para o aumento da nebulosidade na região, principalmente durante os meses de Inverno.

A região Central do Brasil recebe maior incidência de radiação solar durante as estações secas (outono e inverno), particularmente entre os meses de julho e setembro, quando a precipitação é baixa e o número de dias com céu claro é maior.

Romero (2000) demonstra que a intensidade da radiação depende da densidade do ar pelo qual os raios devem penetrar. Dessa forma, a nebulosidade e a ocorrência de precipitações são fatores que influenciam a radiação solar.

Para a autora, quando o céu está encoberto, a perda de radiação é mínima, devido ao fato de que as partículas de água das nuvens absorvem e reemitem a maioria da radiação vinda da terra. A autora afirma, portanto, que a radiação é maior quando a atmosfera está clara e seca, e menor quando a quantidade de vapor d'água, poeira e nuvens aumentam.

As **Figuras 27, 28, 29 e 30** mostram a climatologia de umidade, relevo, temperatura e nebulosidade anual para o território brasileiro levando em consideração os dados de campo coletados a partir de 1931 até 1990.

Segundo Romero (2000), a forma da superfície terrestre afeta o microclima. Assim, a topografia é o resultado de processos geológicos e orgânicos, o que resulta em diferentes tipos de clima. As regiões mais acidentadas, em amarelo e laranja no mapa, possuem variação maior no clima. Já as regiões em verde, costumam ser mais perenes.



Figura 27. Mapa de umidade (SWERA, 2006, pg 21)



Figura 28. Mapa de relevo (SWERA,2006, pg 21)



Figura 29. Mapa de temperatura média (SWERA,2006, pg 21)



Figura 30. Mapa de nebulosidade anual (SWERA,2006, pg 21)

A vegetação é outro fator que, para Romero (2000), contribui para o estabelecimento de microclimas, pois a presença de verde auxilia na umidificação do ar através da liberação do vapor d'água pelo processo de fotossíntese. Em geral, a vegetação tende a estabilizar os efeitos do clima sobre seus arredores imediatos, reduzindo os extremos ambientais. Ela também auxilia na diminuição da temperatura do ar, pois absorve energia.

A autora afirma que a força, direção e conteúdo da umidade dos fluxos de ar também são influenciados pela topografia. Os fluxos de ar podem ser desviados ou canalizados pelas ondulações da superfície terrestre. Isso afeta a precipitação, pois quando uma massa de ar é descendente, dificilmente ocorrerão precipitações, por exemplo.

Romero (2000) afirma que a temperatura, depende da quantidade de calor ganho ou perdido pela superfície da terra ou outras superfícies com as quais o ar tenha estado em contato. O ar em contato com a superfície que obteve ganhos de calor é então aquecido por condução. Devido a este fenômeno, o calor adquirido é transferido às camadas superiores. Dessa forma, a radiação solar é a maior fonte de energia do nosso planeta **(Figura 31)**.

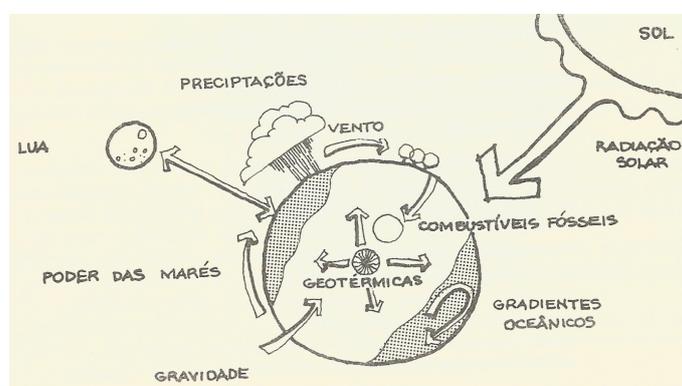


Figura 31. A maior parte da energia da terra provém do Sol (ROMERO,2000, pg. 37)

No entanto, além da radiação solar, outros fatores são apontados por Neves (2005) para a melhor localização de uma Chaminé Solar: a atividade sísmica do local, o padrão das chuvas e tempestades, além de existência de chuvas de granizo.

Segundo Martins et al (2008), a área de maior potencial para implantação de tecnologias solares é o semi-árida do Nordeste brasileiro, com radiação de 6.5kWh/m² dia. Para os autores, esta área apresenta clima semi-árido, com baixa precipitação anual em torno de 300 milímetros, além da menor cobertura de nuvens do Brasil (INMET, 2011), devido à influência da alta pressão tropical associada ao anticiclone tropical do Atlântico Sul .

Para os autores, o potencial mínimo, com radiação de 4.25kWh/m²dia, foi obtido para a zona costeira da região sul do Brasil, que é caracterizada por grande precipitação. O clima temperado e a influência dos sistemas de frio associadas com o anti-ciclone Antártico polar contribui para aumentar a nebulosidade na região, principalmente nos meses de inverno.

Para Martins et al (2008), o centro-oeste possui um valor de radiação média de 5,7 kWh/dia. O que coloca o DF em posição desejável. Para o Distrito Federal, foram coletados dados climáticos durante 1 ano no INMET, de forma a conter dados do período de seca e do período de chuvas (**Gráfico 05**).

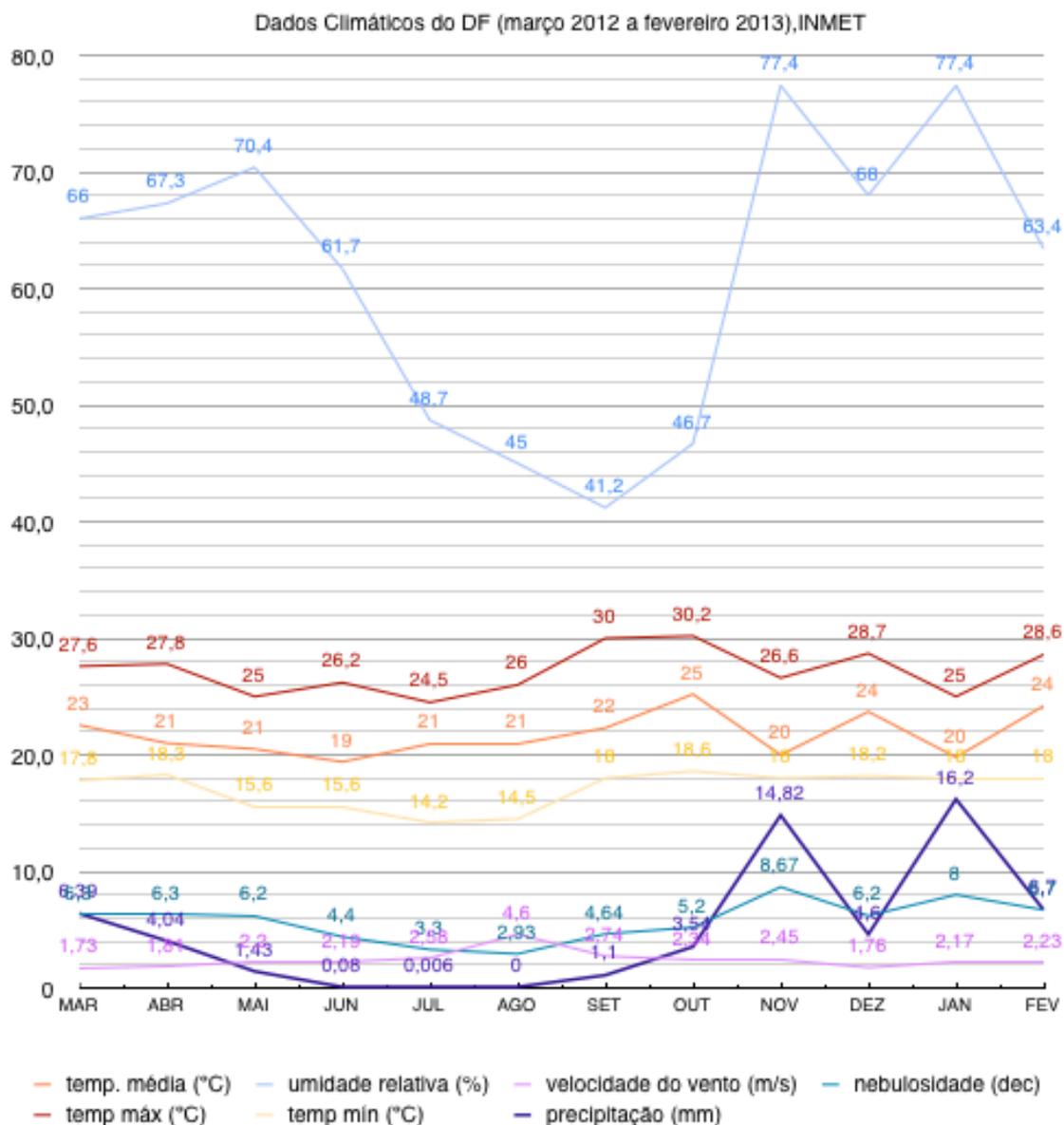
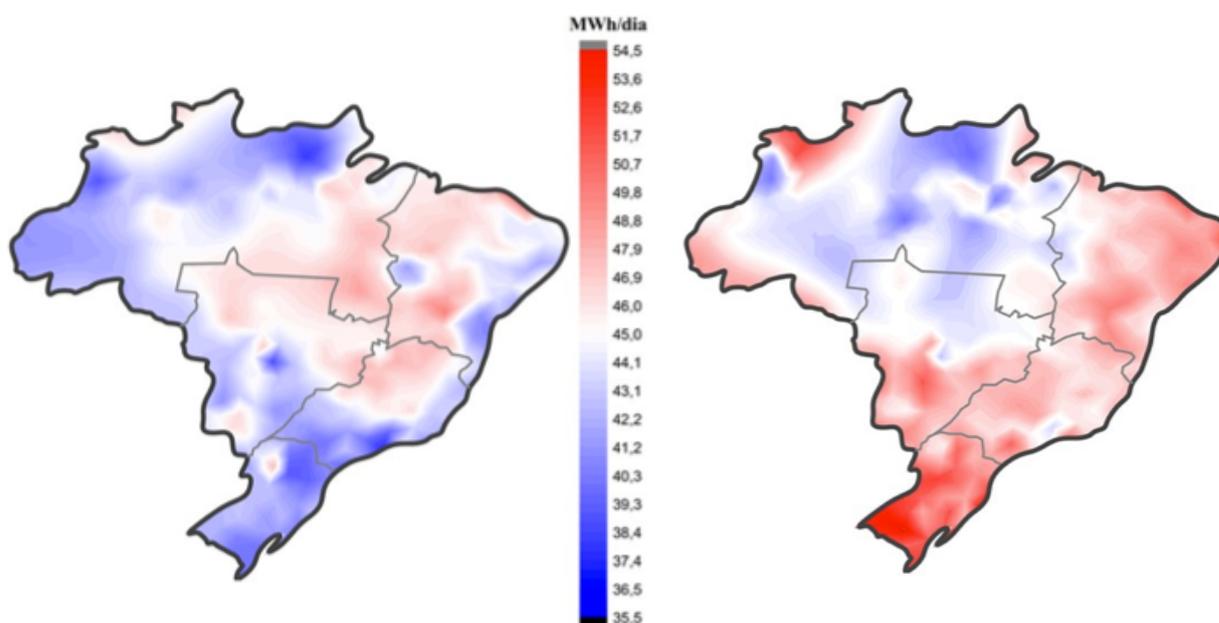


Gráfico 05. Dados climáticos do Distrito Federal de março de 2012 a fevereiro de 2013. (adaptado de INMET, 2011)

No período de um ano a temperatura média variou de 19 a 25 °C, com baixo índice de umidade relativa, máximo de 77,4% somente em dois meses, novembro e janeiro. A nebulosidade média variou de 2,93 a 6,67 decímetros, ou seja, foi baixa, o

que permite a alta incidência de raios solares na região. A precipitação também foi relativamente baixa, chegando até a zero no mês de agosto.

Strobel (2012) elabora modelo matemático e numérico para avaliar tecnicamente a potência de energia no Brasil, com gráficos e análise de sensibilidade para energia gerada, pico de potência e energia gerada pela chaminé. Dessa forma, alguns mapas são gerados para o inverno e para o verão, como a distribuição do potencial de energia (**Figuras 32 e 33**).



Figuras 32 e 33. Mapa de distribuição de potencial energético de Chaminés Solares para o Brasil no Inverno e no Verão. (STROBEL,2012, pg 136)

Os dados são preparados pelo autor em forma de tabelas. O autor afirma que correlações de transferência de calor possuem imprecisão grande, na ordem de 10% a 30% em relação a resultados reais. Desta forma, os fatores que podem ter influenciado as pequenas divergências entre os dados experimentais e os resultados incluem as propriedades do solo (utilizadas baseadas no trabalho de Bernardes et al., 2003) e um fator de ordem de grandeza, ou seja, alguns coeficientes de transferência de calor, por mais díspares que possam ficar da realidade, influenciam muito pouco a energia de saída.

Segundo o autor, verifica-se maior potencial energético no nordeste, mais especificamente em Sergipe, no município de Propriá, que apresenta média de 51,4 MW.h/dia mesmo no inverno.

A região sul possui baixo potencial energético no inverno, assim como as regiões sombreadas da região amazônica. Assim, algumas regiões sombreadas no norte se mantêm com baixo potencial energético também no verão, devido à cobertura amazônica. Porém, na região sul há exceções, mais especificamente no sudoeste do Rio Grande do Sul, onde há forte potencial energético.

Para Strobel (2012) no verão o Distrito Federal recebe 13,2 MJ/m² de radiação solar. Os resultados obtidos com a simulação computacional de uma planta de 500m de altura e um coletor de 1.000 m de diâmetro no inverno foram: pico de potência da Central Chaminé Solar de 4,07 MW, energia diária gerada de 43,78 MWh/dia.

Já no verão, a radiação solar considerada foi de 16,4 MJ/m² e os resultados: 4,32 MW de pico de potência e energia diária de 44,97 MWh/dia. O autor afirma que, do ponto de vista energético, conforme relatório da EPE (2012), o consumo médio per capita no Brasil é de 154 kWh/mês, o que representa uma média diária de aproximadamente 5 kWh/dia. Dessa forma, foi possível elaborar uma tabela de habitantes que seriam beneficiados com uma usina padrão Chaminé Solar no inverno e no verão (**Quadros 07 e 08**).

Para Strobel (2012) em Brasília, no inverno, 8.756 habitantes seriam beneficiados pela energia gerada por uma Chaminé Solar. Já no verão, 8.994 habitantes receberiam energia da central solar proposta. Para a região Centro Oeste o maior potencial se localiza em Cuiabá, em que 10.016 habitantes seriam abastecidos no inverno, e 10.286 no verão.

Região	UF	Cidade	Radiação solar (MJ/m ²)	Energia gerada Planta (MWh/dia)	Habitantes beneficiados
Norte	AP	Macapá	16,40	44,49	8898
	AP	Oiapoque	15,60	43,65	8730
	AM	Coari	18,40	46,09	9218
	AM	Manaus	17,00	44,64	8928
	PA	Belém	18,20	45,99	9198
	PA	Marabá	19,30	47,13	9426
Norte	RO	Porto Velho	17,20	45,22	9044
	RO	Vilhena	16,00	43,96	8792
	RR	Boa Vista	14,40	42,19	8438
	TO	Palmas	20,20	48,69	9738
	TO	Tocantinópolis	18,70	47,09	9418

Nordeste	AL	Pão De Açúcar	14,20	42,48	8496
	AL	Maceió	14,10	42,38	8476
	BH	Salvador	15,00	44,03	8806
	BH	Santa Rita De Cássia	19,20	48,56	9712
	CE	Acaráú	18,60	47,14	9428
	CE	Fortaleza	18,20	46,71	9342
	MA	Caxias	19,00	47,10	9420
	MA	São Luiz	18,00	46,05	9210
	PB	Cajazeiras	18,70	47,59	9518
	PB	João Pessoa	15,40	44,07	8814
	PE	Fernando de Noronha	17,40	46,38	9276
	PE	Recife	13,70	42,45	8490
	PI	Teresina	19,00	46,88	9376
	PI	Uruçuí	19,70	47,61	9522
	RN	Cruzeta	17,10	45,29	9058
	RN	Natal	16,30	44,45	8890
	SE	Aracajú	15,10	43,39	8678
	SE	Propriá	22,60	51,40	10280
Centro Oeste	DF	Brasília	13,20	43,78	8756
	GO	Goiania	18,40	48,68	9736
	GO	Goiás	15,60	45,59	9118
	MG	Cuiabá	20,90	50,08	10016
	MG	Utiariti	18,20	47,15	9430
	MS	Campo Grande	12,00	40,82	8164
	MS	Corumbá	15,60	44,61	8922
Sudeste	ES	Conceição Da Barra	13,00	41,61	8322
	ES	Vitória	13,40	42,02	8404
	MG	Belo Horizonte	14,90	45,61	9122
	MG	Januária	16,60	47,51	9502
	RJ	Cabo Frio	13,80	43,61	8722
	RJ	Rio De Janeiro	11,60	41,26	8252
	SP	São Paulo	10,80	40,45	8090
Sul	PR	Curitiba	10,20	39,65	7930
	PR	Londrina	12,40	41,97	8394
	RS	Ijuí	11,60	44,73	8946
	RS	Porto Alegre	8,50	41,19	8238
	SC	Araranguá	12,80	44,96	8992
	SC	Florianópolis	9,90	41,70	8340

Quadro 07. Tabela de habitantes beneficiados com a Chaminé Solar por região do Brasil no inverno (STROBEL, 2012, pg 146).

Região	UF	Cidade	Radiação solar (MJ/m ²)	Energia gerada Planta (MWh/dia)	Habitantes beneficiados
Norte	AP	Macapá	18,60	46,47	9294
	AP	Oiapoque	20,20	48,15	9630
	AM	Fonte Boa	18,90	46,20	9240
	AM	Manaus	17,20	44,45	8890
	PA	Belém	18,40	45,73	9146
	PA	Soure	21,00	48,44	9688
	RO	Porto Velho	15,20	42,47	8494
	RR	Boa Vista	18,10	45,29	9058
	TO	Palmas	18,90	46,34	9268
	TO	Taguatinga	19,70	47,17	9434
Nordeste	AL	Pão De Açúcar	20,70	47,68	9536
	AL	Maceió	22,00	49,03	9806
	BH	Salvador	21,90	49,40	9880
	BH	Santa Rita De Cássia	22,10	49,62	9924
	CE	Fortaleza	21,50	48,93	9786
	CE	Quixadá	22,00	49,46	9892
	MA	São Luiz	20,70	47,99	9598
	MA	Turialva	20,30	47,57	9514
	PB	João Pessoa	22,80	50,48	10096
	PB	São Gonçalo	22,80	50,48	10096
	PE	Barreiros	23,90	51,48	10296
	PE	Recife	19,70	47,06	9412
	PI	Paulistana	20,70	48,04	9608
	PI	Teresina	19,40	46,69	9338
	RN	Natal	23,00	50,03	10006
	RN	Santa Cruz (Rn)	22,40	49,40	9880
SE	Aracajú	23,30	50,26	10052	
SE	Propriá	22,60	49,53	9906	
Centro Oeste	DF	Brasília	16,40	44,97	8994
	GO	Goiás	18,40	46,28	9256
	GO	Mineiros	21,00	49,02	9804
	MG	Coxipó Da Ponte	19,10	46,39	9278
	MG	Cuiabá	23,90	51,43	10286
	MS	Campo Grande	19,40	46,85	9370
	MS	Fazenda Rio Negro	23,20	50,86	10172
	Sudeste	ES	Conceição Da Barra	20,00	47,57	9514
ES		Vitória	19,60	47,15	9430
MG		Belo Horizonte	18,40	46,24	9248
MG		Ouro Fino	21,90	49,93	9986
RJ		Cabo Frio	21,30	48,71	9742
RJ		Rio De Janeiro	20,20	47,56	9512
SP		Monte Alegre Do Sul	22,60	51,10	10220
SP		São Paulo	17,60	45,75	9150

	PR	Curitiba	19,70	47,77	9554
	PR	Toledo	23,00	51,30	10260
Sul	RS	Passo Fundo	26,40	54,36	10872
	RS	Porto Alegre	23,30	51,02	10204
	SC	Curitibanos	24,30	52,74	10548
	SC	Florianópolis	20,60	48,75	9750

Quadro 08. Tabela de habitantes beneficiados com a Chaminé Solar por região do Brasil no verão (STROBEL, 2012, pg 148).

Segundo Schlaich (1995), com o protótipo de Manzanares concluiu-se que os valores termodinâmicos obtidos para o coletor, chaminé e turbinas são similares tanto para pequenas como para grandes centrais, mesmo com as enormes diferenças na área e volume das estruturas. Nesse sentido, o que diferencia a potência final calculada por Strobel para a mesma Chaminé Solar para Brasília são os módulos fotovoltaicos que o autor acrescenta. Dessa forma, Strobel chega a um valor de 43,7 KWh/dia, com uma planta paralela a central solar que possa fornecer energia fotovoltaica ao final.

Abaixo segue o cálculo segundo Schlaich (1995), sem o uso complementar de células fotovoltaicas, para a potência elétrica final da Chaminé usando dados do Distrito Federal:

$$P_{\text{elétrico}} = \frac{2}{3} \eta_{\text{col}} \cdot \eta_{\text{wt}} \cdot \frac{g}{C_p \cdot T_o} \cdot H_c \cdot A_{\text{col}} \cdot G$$

$P_{\text{elétrico}}$ = potência de saída ou output elétrico

η_{col} = eficiência do coletor

η_{wt} = eficiência mecânica = eficiência das turbinas, da transmissão e do gerador

g = aceleração da gravidade

H_c = altura da chaminé

A_{col} = área do coletor

G = irradiação solar

C_p = capacidade de aquecimento do ar

T_o = temperatura ambiente

Para o Distrito Federal, pode-se estimar potência final de 5,4 MW, mantendo-se constantes as eficiências do coletor (η_{col}) e a eficiência mecânica (η_{wt}), segundo a equação:

$$P_{eletric} = \frac{2}{3} 0,8 \cdot 0,6 \cdot \frac{9,81}{1005 \cdot 293} \cdot 500 \cdot 785000 \cdot 1300$$

$$P_{eletric} = 5439617,08 \text{ W} = 5,4 \text{ MW}$$

$$\eta_{col} = 0,6$$

$$\eta_{wt} = 0,8$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$H_c = 500 \text{ m}$$

$$D_{col} = 1000 \text{ m}$$

$$A_{col} = 785000 \text{ m}^2$$

$$G = 1300 \text{ W/m}^2$$

$$C_p = 1005 \text{ J/kgK}$$

$$T_o = 20^\circ \text{ C} = 293 \text{ K}$$

Segundo Neves (2005), sua eficiência depende ainda de sua dimensão, a qual possui relação direta com seu custo e potência elétrica de saída. O autor afirma que os fatores que determinarão o desenho da Chaminé Solar para um determinado local, com a potência elétrica final fixa, serão os custos dos materiais, o transporte e a mão de obra local.

Nesse sentido, as dimensões da chaminé e do coletor, para uma determinada potência elétrica final, devem ser determinadas com base nos custos de fabricação e construção destas estruturas no local escolhido. Além disso, segundo Neves (2005), não há um ótimo físico para os cálculos dos custos de uma Chaminé Solar.

No entanto, fatores locais possuem influência direta na construção da Chaminé Solar, determinando quando será melhor construir uma central mais alta ou mais larga. De acordo com a CEB (2013) o consumo de energia no Distrito Federal é medido em cada região administrativa conforme o **quadro 09**.

REGIÕES ADMINISTRATIVAS	NÚMERO DE CONSUMIDORES (posição em 31/12)				
	Rural	Poder público	Iluminação pública	Serviço público	Consumo próprio
DISTRITO FEDERAL	9.793	5.226	19	293	47
Plano Piloto	176	2.681	1	22	11
Gama	957	149	1	16	2
Taguatinga	214	415	1	11	4
Brazlândia	1.527	99	1	11	3
Sobradinho	1.042	143	1	60	5
Planaltina	2.335	183	1	32	2
Paranoá	1.102	115	1	22	2
Núcleo Bandeirante	186	72	1	8	1
Ceilândia	711	221	1	4	2
Guará	59	229	1	7	4
Cruzeiro	-	274	1	1	4
Samambaia	235	129	1	10	1
Santa Maria	243	118	1	12	2
São Sebastião	221	74	1	34	1
Recanto das Emas	132	90	1	4	1
Lago Sul	280	68	1	26	1
Riacho Fundo	224	71	1	4	-
Lago Norte	147	70	1	9	1
Candangolândia	2	25	1	-	-
Águas Claras	...	...	...	...	...
Riacho Fundo II	...	...	...	...	...
Sudoeste/ Octogonal	...	...	...	...	...
Varjão	...	...	...	...	...

Park Way	...	...	...	...	...
SCIA(1)	...	...	...	...	...
Sobradinho II	...	...	...	...	...
Jardim Botânico	...	...	...	...	...
Itapoã	...	...	...	...	...
SIA(2)	...	...	...	...	...
Vicente Pires	...	...	...	...	...
Fercal	...	...	...	...	...

Quadro 09. Número de consumidores de energia elétrica no Distrito Federal (adaptado de CEB, 2013).

Assim, é dividido em cinco categorias: consumo rural, iluminação pública, poder público, serviço público e consumo próprio. Cada uma delas possui relação com o tipo de uso final da energia.

Segundo a CEB (2013), o Poder Público representa o fornecimento para unidade consumidora onde, independente da atividade desenvolvida, for solicitado por pessoa jurídica de direito público que assuma as responsabilidades inerentes à condição de consumidor, com exceção dos casos classificáveis como Serviço Público de Irrigação Rural, Escola Agrotécnica, iluminação Pública e Serviço Público, incluído nesta classe o fornecimento provisório, de interesse do Poder Público, e também solicitado por pessoa jurídica de direito público, destinado a atender eventos e festejos realizados em áreas públicas, devendo ser consideradas as seguintes subclasses: Poder Público Federal, Poder Público Estadual ou Distrital e Poder Público Municipal.

Já o Serviço Público é o fornecimento, exclusivamente, para motores, máquinas e cargas essenciais à operação de serviços públicos de água, esgoto, saneamento e tração elétrica urbana e/ou ferroviária, explorados diretamente pelo Poder Público ou mediante concessão ou autorização, devendo ser consideradas as seguintes subclasses: Tração Elétrica; Água, Esgoto e Saneamento.

O Consumo Próprio é destinado ao consumo de energia elétrica da própria concessionária, devendo ser considerada as seguintes subclasses: Próprio (fornecimento para escritório, oficina, almoxarifado e demais instalações da própria concessionária, diretamente ligadas à prestação de serviços de eletricidade, não incluídas as subclasses seguintes), Canteiro de Obras (energia para canteiro de obras da própria concessionária) e Interno (fornecimento para instalações e dependências

internas de usinas, subestações e demais locais diretamente ligados à produção e transformação de energia elétrica).

No Distrito Federal, portanto, com a potência instalada de 5,4 MW, seria possível complementar a distribuição das Usinas Hidrelétricas locais, além de abastecer determinadas classes de regiões administrativas menores, como o setor industrial. A energia produzida, resultado da potência no tempo, seria 47.304 MWh/ano. O **quadro 10** apresenta em destaque (cinza) as regiões que mesmo sem a interligação dos sistemas poderiam ser beneficiadas.

REGIÕES ADMINISTRATIVAS	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA (MWh)			
2012	Total	Residencial	Industrial	Comercial
DISTRITO FEDERAL	5.665,762	2.074,439	240,061	1.903,666
Plano Piloto	1.904,077	257,376	30,637	980,701
Gama	225,006	92,594	40,143	44,976
Taguatinga	813,488	356,638	49,109	261,370
Brazlândia	82,264	30,560	9,209	12,197
Sobradinho	215,466	125,983	9,907	39,304
Planaltina	214,547	96,256	8,385	25,495
Paranoá	90,112	54,701	1,422	10,107
Núcleo Bandeirante	112,857	56,135	1,687	32,189
Ceilândia	510,758	240,151	5,039	78,495
Guará	320,677	118,523	19,040	148,447
Cruzeiro	207,230	96,592	5,014	81,497
Samambaia	247,713	123,414	40,193	37,259
Santa Maria	142,175	70,217	14,961	28,966
São Sebastião	92,390	55,464	1,218	14,260
Recanto das Emas	96,465	63,457	308	14,628
Lago Sul	188,800	112,253	923	47,066
Riacho Fundo	71,706	48,902	318	10,818
Lago Norte	108,418	62,340	1817	30,074
Candangolândia	21,613	12,883	731	5,817

Quadro 10. Regiões que podem ser abastecidas diretamente por uma Chaminé Solar (adaptado de CEB, 2013).

4.2 O DISTRITO FEDERAL

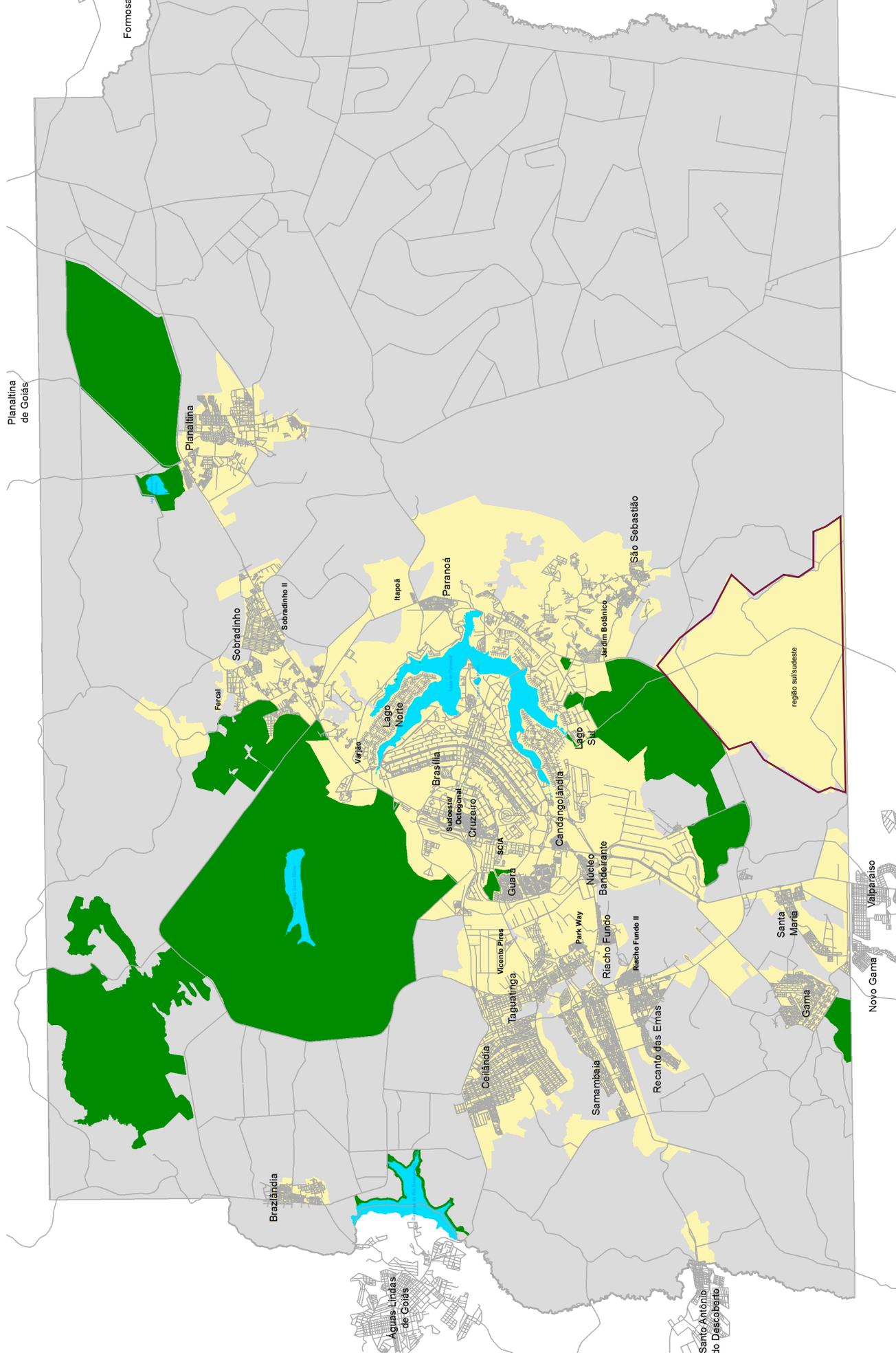
4.2.1 A Capital Federal e suas Regiões Administrativas

Dados do Distrito Federal são necessários para o entendimento das características urbanas locais. Assim, são apresentados dados do território a partir de referências do IBGE, da Codeplan, além da Administração Regional de Brasília. Em seguida são descritos dados de seu clima, relevo e vegetação, com o uso de mapas do PDOT, do SolarGis, da Terracap e do Inmet. Com esses elementos são definidas três grandes áreas em que podem ser implementadas Chaminés Solares. Os principais autores de referência são Romero (2001), Jatobá (2011), Ribeiro (2008) e Neves (2005).

O Distrito Federal é uma das 27 unidades federativas do Brasil. Se situa na Região Centro-Oeste e tem por limites os estados de Goiás a sul, oeste, norte e leste e Minas Gerais a sudeste. Sua área total é de 5.779,99 km², sendo assim a menor unidade federativa brasileira. Em seu território está localizada a capital federal do Brasil, Brasília, atual sede do governo do Distrito Federal.

Segundo a Lei 4545 de 1964, o Distrito Federal não é um estado e nem um município, mas sim um território autônomo, que se subdivide em 31 (trinta e uma) Regiões Administrativas (RA's) (**anexo 02**). A localização de cada região está assinalada na **Figura 34**, com exceção da região sul/sudeste, que é somente uma área de expansão atual.

Para a Codeplan (2013) com exceção de Brasília, as outras regiões administrativas são conhecidas como cidades-satélites e possuem certa autonomia em suas administrações, pois para cada uma delas é nomeado um administrador. Logo, funcionam como cidades, embora não possuam prefeitos ou vereadores e sim administradores regionais e secretários indicados pelo Governador do Distrito Federal.



— Sistema Viário
 Lago

Macrozonas
 Macrozona de Proteção Integral
 Macrozona Rural
 Macrozona Urbana

MAPA 1 - Macrozoneamento do Distrito Federal

PDOT/2012 - Lei Complementar nº 854 de 15 outubro de 2012



Figura 34. Mapa de Macrozoneamento com a indicação das Regiões Administrativas do Distrito Federal (adaptado de SEDHAB, 2012).

A Região Administrativa I (RA-I), denominada Brasília ou Plano Piloto, é o centro político do Brasil. A cidade é fruto de um concurso público, quando da mudança da capital do país do Rio de Janeiro para a Região Centro-Oeste.

Possui projeto urbanístico pensado por Lúcio Costa e edifícios construídos por Oscar Niemeyer, vencedores do concurso em 1957. Ainda no DF, mas separados da RA-I estão as cidades-satélite do entorno a sudoeste, que incluem Gama, Ceilândia, Taguatinga, Samambaia, Núcleo Bandeirante, Sobradinho, Planaltina, e agora Águas Claras. Estes conjuntos urbanos, com exceção do Gama e de Sobradinho, não foram planejados e se desenvolveram naturalmente.

Em 1997, foi aprovada a Lei 1648, que altera o nome da região de Brasília para Plano Piloto. Dessa forma, a RA-I é composta de diferentes bairros e setores, como a Asa Norte, Asa Sul, Setor Militar Urbano, Setor de Garagens e Oficinas, Setor de Indústrias Gráficas, Área de Camping, Eixo Monumental, Esplanada dos Ministérios, Setor de Embaixadas Sul e Norte, Vila Planalto, Granja do Torto, Vila Telebrasil, Setor de áreas Isoladas Norte. Além disso, sedia os três poderes da República: Executivo, Legislativo e Judiciário.

Segundo a Administração Regional de Brasília (2013) entre as áreas que já fizeram parte da RA-I, podem-se citar o Cruzeiro, desmembrado em 1989; os Lagos Norte e Sul, que se tornaram regiões administrativas separadas em 1994; e o Sudoeste e Octogonal, criado como região administrativa em 2003.

De acordo com o IBGE (2013), o Distrito Federal possui uma população de 2.789.761 habitantes, distribuídos em uma área de 5.779,99 km². A densidade demográfica é de 444,66 hab/km². No entanto, a maioria desses habitantes se situam no entorno e fazem o movimento pendular todos os dias em direção ao centro urbano de Brasília.

Segundo a Sedahb (2013), a demanda pela criação de novas cidades é crescente, visto que o êxodo rural é problema presente na capital federal (**Gráfico 06**). Para Jatobá (2011) em 2007 a cidade subiu de categoria em 35 anos, de Centro Regional B à Metrópole Nacional, assim como São Paulo e Rio de Janeiro.

Para a Terracap (2013), a aglomeração urbana de Brasília é o conjunto urbano com maior potencial de crescimento urbano no país nos próximos anos. A estrutura urbana polinucleada e o padrão disperso de ocupação criam condição para a continuidade da expansão horizontalizada.

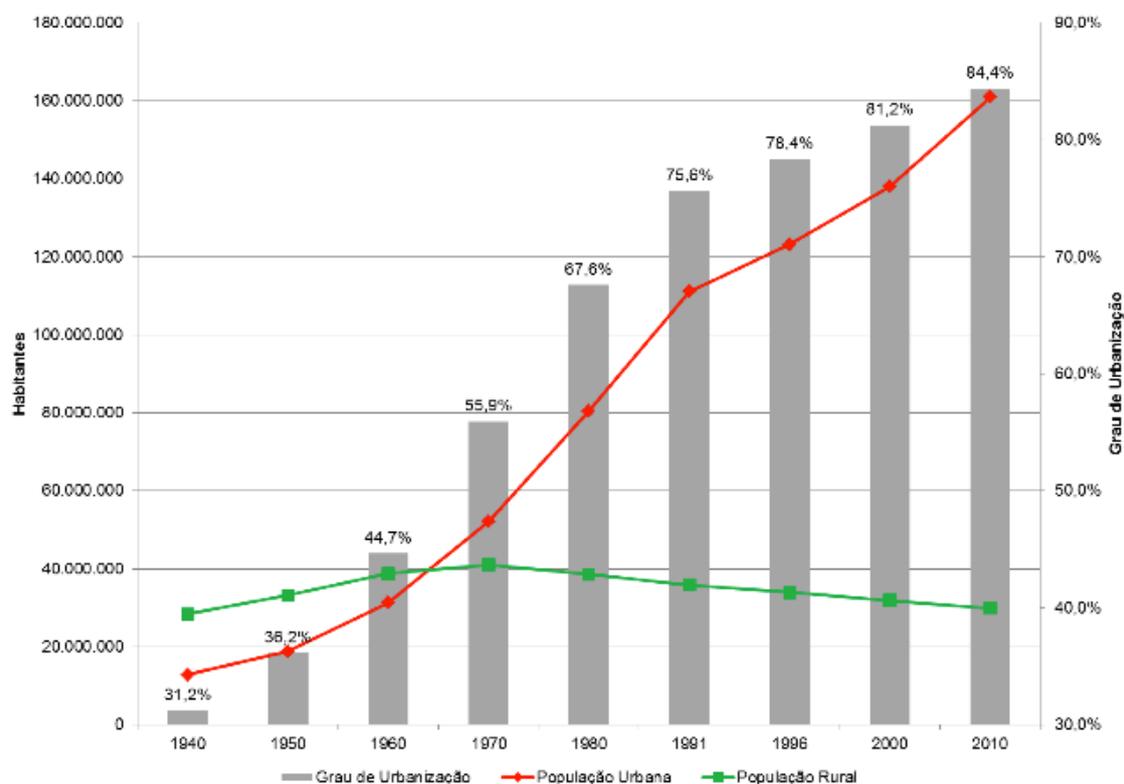


Gráfico 06 . Gráfico do grau de urbanização do Distrito Federal (RIBEIRO, 2008).

Nesse sentido regiões incentivadas pelo governo aparecem no cenário urbano, como a região Sul/Sudeste delimitada em vermelho na Figura 34, situada próxima à DF-140, entre Santa Maria e São Sebastião. A expectativa é que o local abrigue cerca de 900 mil habitantes nas próximas cinco décadas.

Segundo a Sedhab (2013) o plano que estabelecerá as diretrizes para a ocupação da área foi apresentado no dia 2 de outubro de 2013 em um seminário promovido por empresários da construção civil. Para a secretaria, o lugar pode ser a última região destinada à ocupação urbana no DF, o que dificilmente acontecerá devido ao excessivo descaso pela preocupação ambiental na região.

De acordo com o secretário de Habitação Regularização e Desenvolvimento Urbano, Geraldo Magela, o debate se deu após vários proprietários de lotes no local pedirem autorização para fazer o parcelamento das áreas.

No entanto, para Ribeiro (2008), os contrapontos a esse quadro de prosperidade são o acirramento das desigualdades socioespaciais entre o centro dinâmico e a periferia paupérrima, transferida para fora do DF. Assim, também aumenta as pressões ambientais na região.

4.2.2 A População e a Economia

Devido a sua arquitetura moderna, Brasília é uma cidade tombada pelo IPHAN. Além disso, possui o Título de Patrimônio Cultural da Humanidade, dado pela Unesco em 1987.

Segundo o IBGE (2013) é a terceira cidade mais rica do Brasil, com o Produto Interno Bruto (PIB) de 99,5 bilhões de reais, superado apenas por São Paulo e Rio de Janeiro. Representa 3,76% de todo o PIB brasileiro e se encontra entre as áreas urbanas de maior índice de renda per capita do Brasil. Dessa forma, é um importante centro econômico.

Assim, no DF, existe o incentivo ao desenvolvimento de indústrias não poluentes como a de software, a do cinema e vídeo, além da geomorfologia, entre outras, com ênfase na preservação ambiental e na manutenção do equilíbrio ecológico.

Embora o Turismo exerça papel relevante na dinâmica da cidade, devido aos diversos projetos arquitetônicos de Oscar Niemeyer, sua economia é dominada pelos setores de Serviços e Indústrias.

O setor de serviços compõe 91% do PIB e resulta da função administrativa da capital. Assim, o setor de Serviços é representado pelos serviços de Governo (cerca de 40% dos empregos da cidade), Comunicações (sede da empresa Brasil Telecom, além das oficinas da TV Câmara, Senado e Justiça), Finanças (sede do Banco do Brasil, Banco Rural, Banco de Brasília, Caixa Econômica Federal, etc.), Entretenimento, Tecnologia e Informática (sede de companhias como Politec, Poliedro, CTIS, etc.) e Serviços legais.

Já no setor de indústrias se destacam as Indústrias da Construção (Paulo Octavio, Via Construções, Irmãos Gravia, etc.), de Processamento de Alimentos (Perdigão, Sadia, etc.), da Fabricação de Móveis, da Reciclagem (Novo Rio, Latasa, etc.), Farmacêuticas, bem como de Imprensa e Editorial. A agricultura e a avicultura ocupam lugar de destaque nesse setor, um cinturão verde na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno abastece a cidade e já exporta alimentos para outros locais.

Logo, Jatobá (2011) afirma que a esse potencial de crescimento urbano se agregam a alta renda per capita da população, a crescente influência econômica e regional de Brasília, e o crescimento populacional positivo. Desse modo, favorecem a demanda por habitação e atraem investidores imobiliários.

Como consequência, há a concentração de empregos no Plano Piloto, além da concentração de população na periferia. Assim, aumento da segregação socioespacial.

O Distrito Federal como capital federal é pólo atrativo de crescimento e de novos investimentos. Nesse sentido, agir de forma planejada sobre o espaço urbano implica o desenvolvimento, utilização e explicitação de conhecimento sobre ele. Sem estes, políticas de intervenção continuarão a exaltar problemas urbanos, além de intensificar diversas questões ambientais decorrentes do crescimento desordenado da cidade.

4.2.3 Paisagem, Geografia e Clima

O relevo do DF é constituído por planaltos e chapadas. Romero (2011) afirma que as chapadas em Brasília formam uma “muralha” que constitui ao mesmo tempo um horizonte e um fechamento. Para a autora, essa dupla função é um dos elementos definidores da relação entre o céu e a terra no sítio.

Romero (2011) destaca que na estrutura da paisagem o céu tem papel fundamental. No DF a abóbada celeste pode ser percebida quase como uma calota completa. A autora afirma que ao longo do dia a variação da luz é absolutamente marcante durante o nascer e o pôr do sol. Assim, a autora completa:

“O habitar no Planalto é estar em constante contato com o céu e em contemplação do horizonte e da paisagem, no qual a vista alcança grandes distâncias. (ROMERO, 2011, pg 34).”

A vegetação possui características típicas do cerrado. Esse tipo de vegetação faz parte de longo processo de evolução, no qual as plantas buscaram adaptar-se às difíceis condições ambientais como: pouca água, falta de umidade no ar e acidez no solo, como caracteriza a Codeplan (2013).

Assim, o cerrado é composto por árvores de galhos e caules grossos e retorcidos, distribuídos de forma esparsa, onde também existem gramíneas, espécies de capins que se desenvolvem embaixo das árvores, além de algumas espécies semi-arbustivas (**Figura 35**).

Segundo a Codeplan (2013) há também a existência de mata-ciliar, composta por florestas estreitas e densas, formada ao longo do leito dos rios e riachos, por encontrar solos mais férteis e com boa umidade, o que proporciona o bom desenvolvimento dessas espécies. Além disso, os brejos, que são localizados nas nascentes de água onde desenvolve-se em grandes proporções a árvore do Buriti. Entre as espécies de plantas que ficam mais em evidência, podemos destacar: Ipês, Pindaíba, Óleo Vermelho, Pau-Santo, Gabiroba, Araça e a Sucupira.

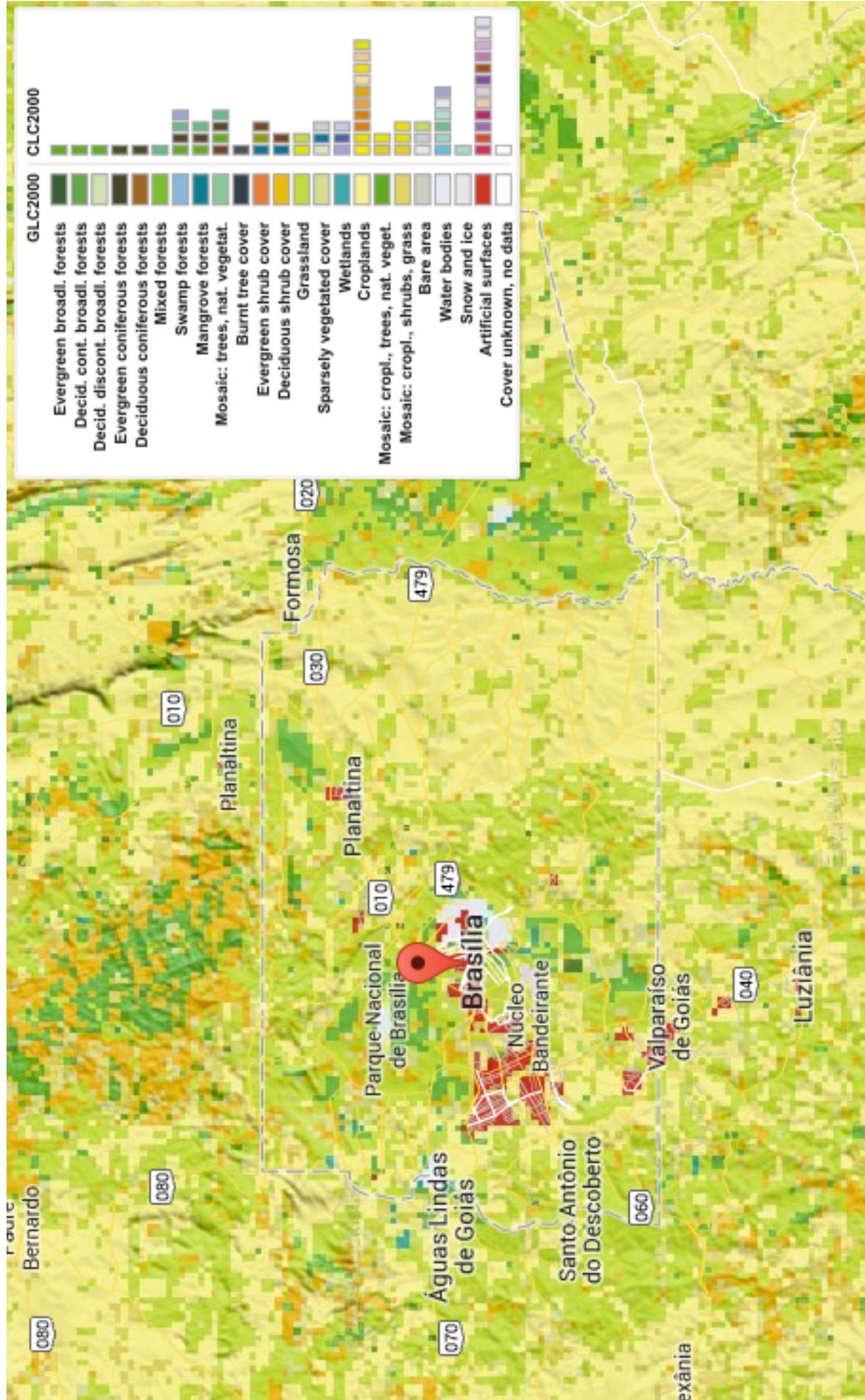


Figura 35. Mapa de vegetação (SWERA,2006, pg 55)

Característica marcante na paisagem da região é a nítida mudança da vegetação nos meses de chuva (verão) para os meses de seca (inverno). Romero (2011) destaca que a divisão rítmica do tempo entre uma estação e outra é elemento fundamental na estruturação do lugar.

No verão o DF adquire uma paisagem bastante verde. Já no inverno, o capim seca e praticamente todas as árvores mudam suas folhagens, cada árvore ao seu tempo, de modo que não acontece de todas as árvores de uma mesma espécie trocarem de folhas todas ao mesmo tempo. No entanto, a paisagem em geral se encontra nos tons de marrom, amarelo e verde acinzentado.

Segundo Romero (2001) o DF se localiza em terreno plano ou com suaves ondulações. Sua altitude varia de 600 a 1 100 metros acima do nível do mar. Nessa região localizam-se as cabeceiras de afluentes de três rios brasileiros: Rio Maranhão (afluente do Rio Tocantins), Rio Preto (afluente do Rio São Francisco) e rios São Bartolomeu e Descoberto (tributários do Rio Paraná).

Assim, o polígono do Distrito Federal está situado em um alto regional e não apresenta grandes drenagens superficiais, sendo um divisor natural de três grandes bacias hidrográficas. Dessa forma, as águas subterrâneas têm função estratégica na manutenção de vazões dos cursos superficiais e no abastecimento de núcleos rurais, urbanos e condomínios.

Para Romero (2001), o clima predominantemente no DF é o tropical de altitude sazonal com o verão chuvoso e quente (entre outubro e março) e o inverno frio e seco (entre abril e setembro). Os índices de umidade são baixos e giram em torno de 25% no inverno e 68% no verão, o que culmina em um clima da região do cerrado.

O **quadro 11** resume o arquivo climático do DF (Labee, 2013), que mostra a temperatura média anual de 20 graus celsius, e ao longo do ano possui variações de 13 a 27 graus celsius.

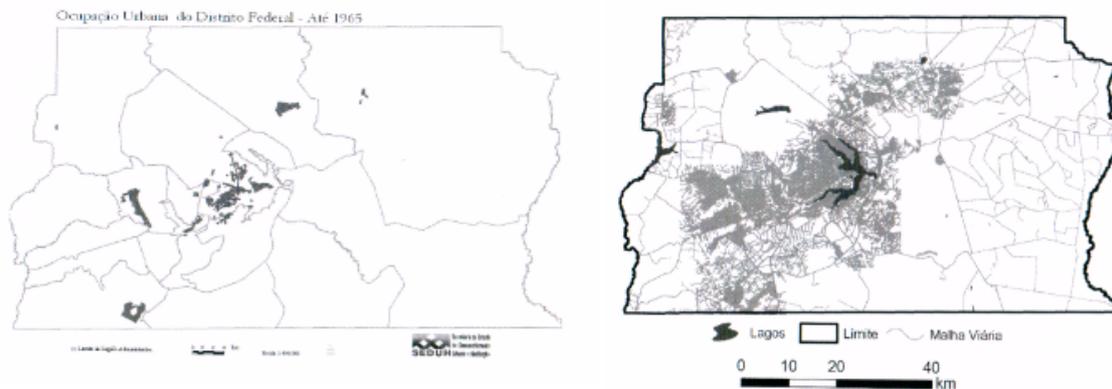
Média dos dados horários							
	tbs (oC)	tbu (oC)	pressão (kPa)	neb	rad global (Wh/m ²)	rad direta (Wh/m ²)	veloc.do ar (m/s)
Máxima	33	24.5	90.5	10	1286	1135	15
Média	20.7	17.3	89.8	6.1	238.8	167.7	1.7
Mínima	6.1	5.1	89	0	0	0	0

Quadro 11. Quadro resumo do arquivo climático do Distrito Federal (Labee, 2013).

Romero (2011) afirma que à medida que Brasília ia sendo edificada, a paisagem natural ia dando lugar a uma outra, completamente diferente. A escala do

projeto de Lucio Costa obedecia a escala da paisagem, em que existia uma alternância equilibrada entre espaços construídos e espaços abertos com vegetação e extensos gramados desertos. Dessa forma, a cidade era circundada pelo cerrado.

No entanto, o crescimento acelerado da capital federal ocorreu de forma desordenada. As **Figuras 36 e 37** apresentam a comparação entre as ocupações urbanas no DF entre 1965 e 2010. Romero (2011) afirma que assim ocorreu o desvio do projeto inicial, o que levou aos problemas atuais de falta de integração e convívio entre as regiões do DF.



Figuras 36 e 37. Manchas urbanas no Df em 1965 e em 2010. (SEDHAB, 2012).

Para a autora, essa mudança deve ser considerada como fator relevante, pois o desenho urbano se refere diretamente ao clima, visto que sua relação possui influência na temperatura, umidade, velocidade e direção dos ventos, além da insolação total horizontal.

Nesse sentido, a preocupação com o desenvolvimento urbano sustentável possui relação direta com a paisagem do ambiente construído. Os elementos e fatores do clima, vegetação e relevo locais possuem relação direta com a adequação do espaço e seu estudo deve ser premissa fundamental para a compreensão e atuação no espaço público.

4.2.4 Análise dos Locais de Implantação de Chaminés Solares no DF

Neste tópico são destacadas três possíveis áreas de implantação de uma Chaminé Solar no DF. Mapas da Codeplan, Sedhab, SolarGIS, são analisados de acordo com as premissas de implantação da Chaminé Solar. Dessa forma, áreas de expansão da cidade são apresentadas, e nesses eixos, sugerida a localização de uma central solar. Em seguida, esses locais são avaliados de acordo com a radiação solar incidente, índice pluviométrico, geologia do solo, além de uso do solo. Por fim, conclui-se qual local seria mais propício e a razão de tal escolha.

Assim, no contexto climático e urbano do Distrito Federal, alguns locais possuem maior área disponível, de forma a facilitar a implantação dessa nova tecnologia.

Inicialmente o mapa de unidades de planejamento territorial divide o DF em sete regiões de interesse (**Figura 38**). Dessa forma é possível a inserção de dados das 31 subestações da CEB localizadas nas regiões administrativas do DF. Percebe-se que praticamente todas provêm de fonte hidrelétrica, sendo somente uma delas termoelétrica.

As regiões central e central adjacente I e II recebem maior número de subestações. Nesse sentido as outras quatro regiões delimitadas - norte, sul, leste e oeste, são áreas de expansão com crescimento urbano e necessidades de investimento e planejamento.

As áreas norte e oeste apresentam maior número de subestações. Já as áreas sul e leste somente uma subestação cada, a subestação hidrelétrica do Gama e a subestação do Paranoá, respectivamente.

Em seguida, a partir das regiões de planejamento urbano foram delimitados eixos de expansão urbana (**Figura 39**). A direção inicial dos eixos se deu a partir da RA 1 - Brasília, região central do Distrito Federal e pólo atrativo da cidade. A torre de TV de Brasília foi o marco inicial do estudo.

Já os pontos finais de cada eixo foram as cidades do entorno do território do Distrito Federal, regiões de influência da capital. Assim, ao norte foi criado o eixo Planaltina de Goiás, a leste o eixo Formosa, ao sul o eixo Valparaíso, e a oeste o eixo Águas Lindas de Goiás. Dessa forma, foram delimitadas quatro grandes regiões que serão analisadas de acordo com as premissas de implantação das Chaminés Solares.

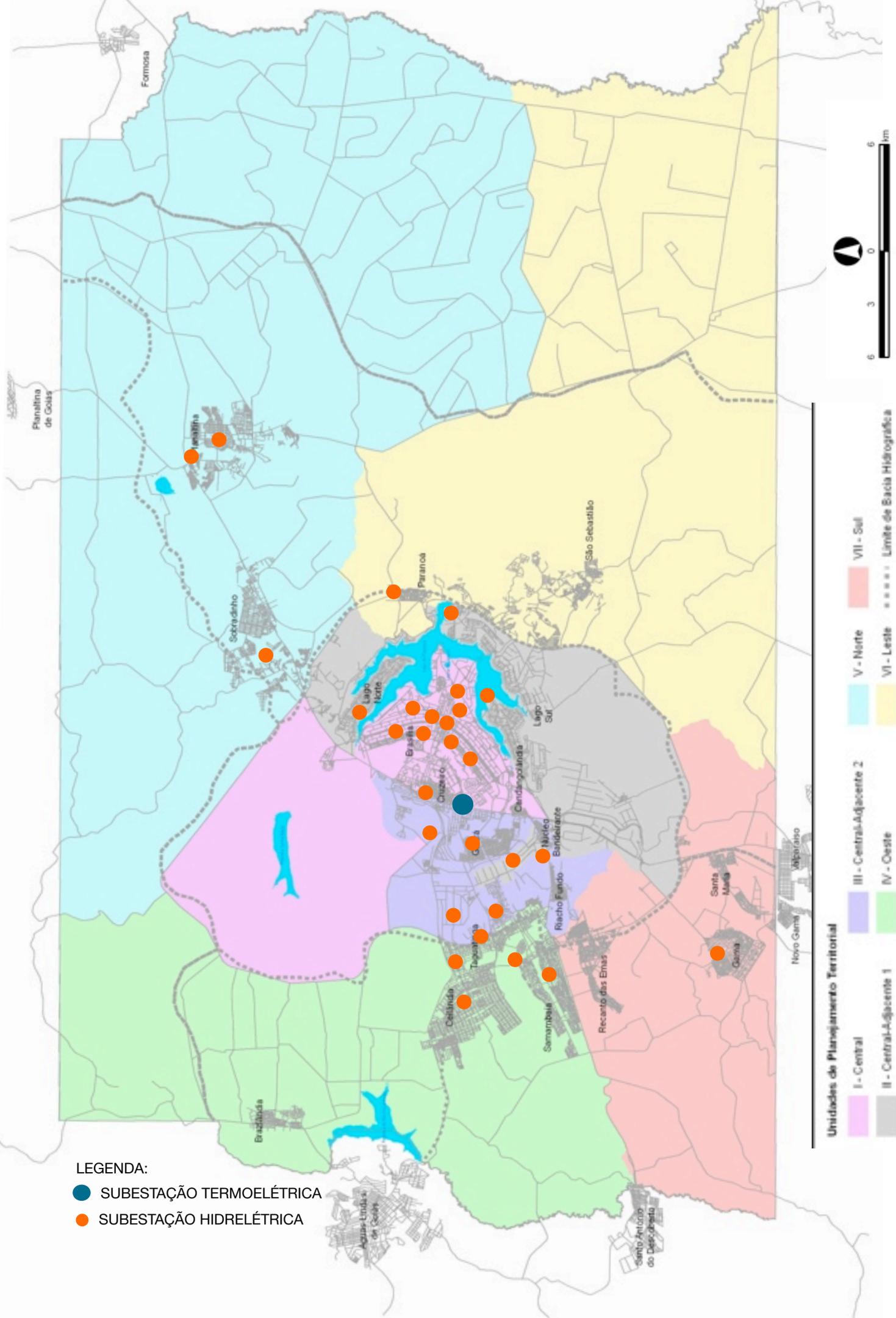


Figura 38. Mapa de Unidades de Planejamento Territorial do Distrito Federal (adaptado de SEDHAB, 2012).

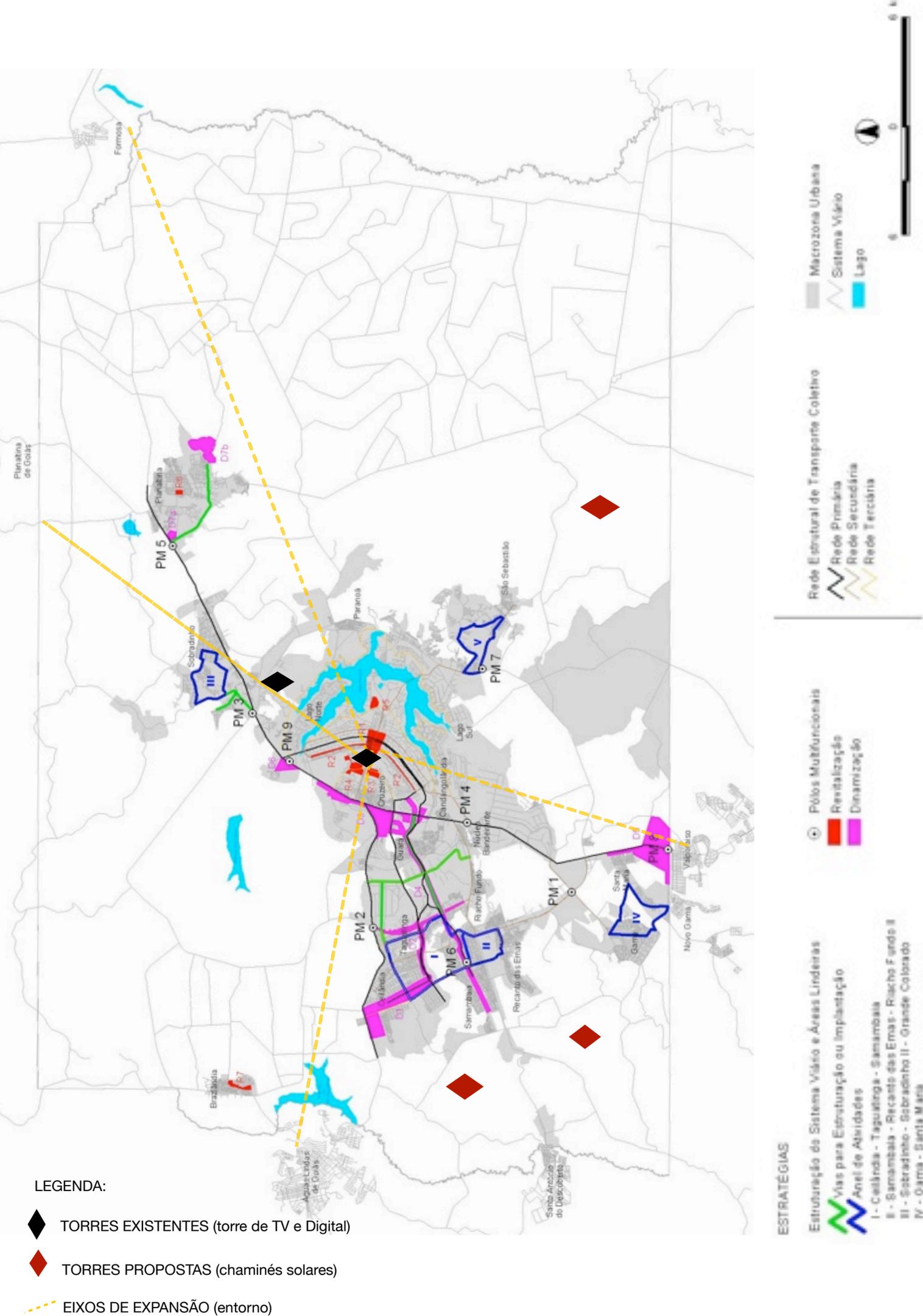


Figura 39. Mapa Estratégias urbanas do Distrito Federal (adaptado de SEDHAB, 2012).

A implantação de uma Chaminé Solar influencia a paisagem urbana da cidade, visto que sua torre pode ser vista como um marco na mesma. Nesse sentido, a região norte não foi contemplada no estudo, visto que já possui um marco vertical, a Torre Digital projetada por Oscar Niemeyer.

A **Figura 39** ainda apresenta as estratégias urbanas do sistema viário e áreas urbanas. Dessa forma, destacam-se os pólos multifuncionais de São Sebastião (região leste), Santa Maria (região sul), Samambaia (região oeste) e Taguatinga (região oeste). Logo, foram propostas três torres do tipo Chaminés Solares. Duas na região oeste e uma na região leste.

A seguir, mapas com parâmetros ambientais foram organizados de modo a delimitar e restringir a área de implantação dessas Chaminés Solares no território do Distrito Federal.

Foram considerados inicialmente fatores de zoneamento, uso do solo e áreas controladas. Dessa forma, para o melhor desempenho da tecnologia, a Chaminé Solar deve ser localizada em áreas verdes livres, com possibilidade de uso do solo da região. Além disso, é importante que se situe ao lado de zonas urbanas, que possam ser abastecidas de forma direta pela energia gerada na central.

Nesse sentido, as **Figuras 40, 41 e 42** representam respectivamente os mapas de macrozoneamento, zoneamento de uso do solo e zonas controladas do Distrito Federal.

Assim, de acordo com a **Figura 40** as Chaminés Solares foram restritas à macrozonas rurais, já que são áreas livres, ao lado de macrozonas de expansão urbana. Foram evitadas as áreas de proteção ambiental. As **Figuras 41 e 42** dividem o território em um número maior de zonas.

A Torre Oeste 01 se situa ao lado de zona urbana de expansão e qualificação, no caso Samambaia. Enquanto que a Torre Oeste 2 se situa em uma áreas livre desocupada, o que pode facilitar a implantação de mais de uma Chaminé Solar na Central. Por outro lado, a Torre Leste apresenta zona urbana consolidada (Paranoá), bem como zonas urbanas de expansão em seu entorno, como a região sul/sudeste já apresentada no tópico anterior. Dessa forma, percebe-se que a localização das Chaminés propostas podem ser classificadas em zonas rurais de uso diversificado.

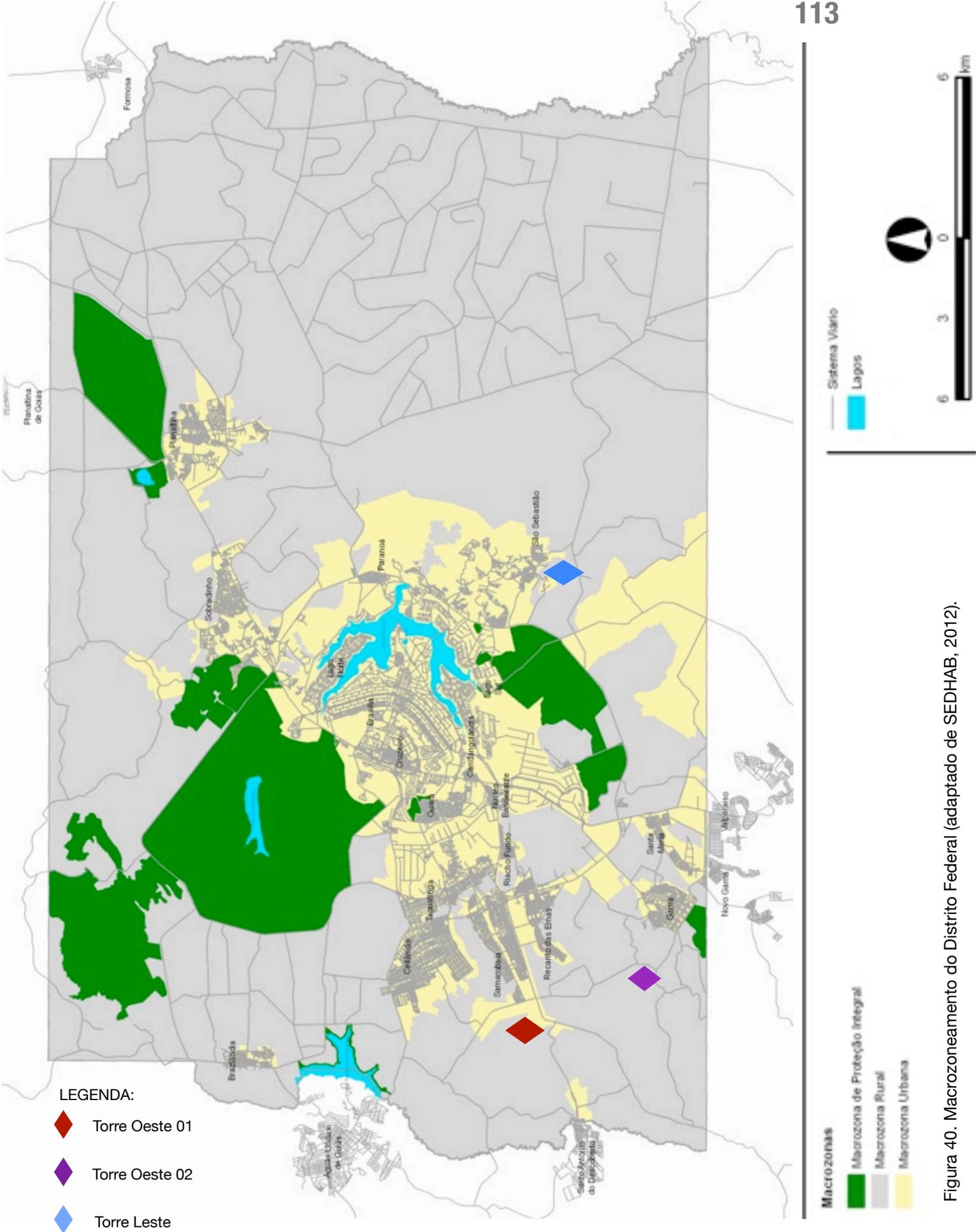


Figura 40. Macrozoneamento do Distrito Federal (adaptado de SEDHAB, 2012).

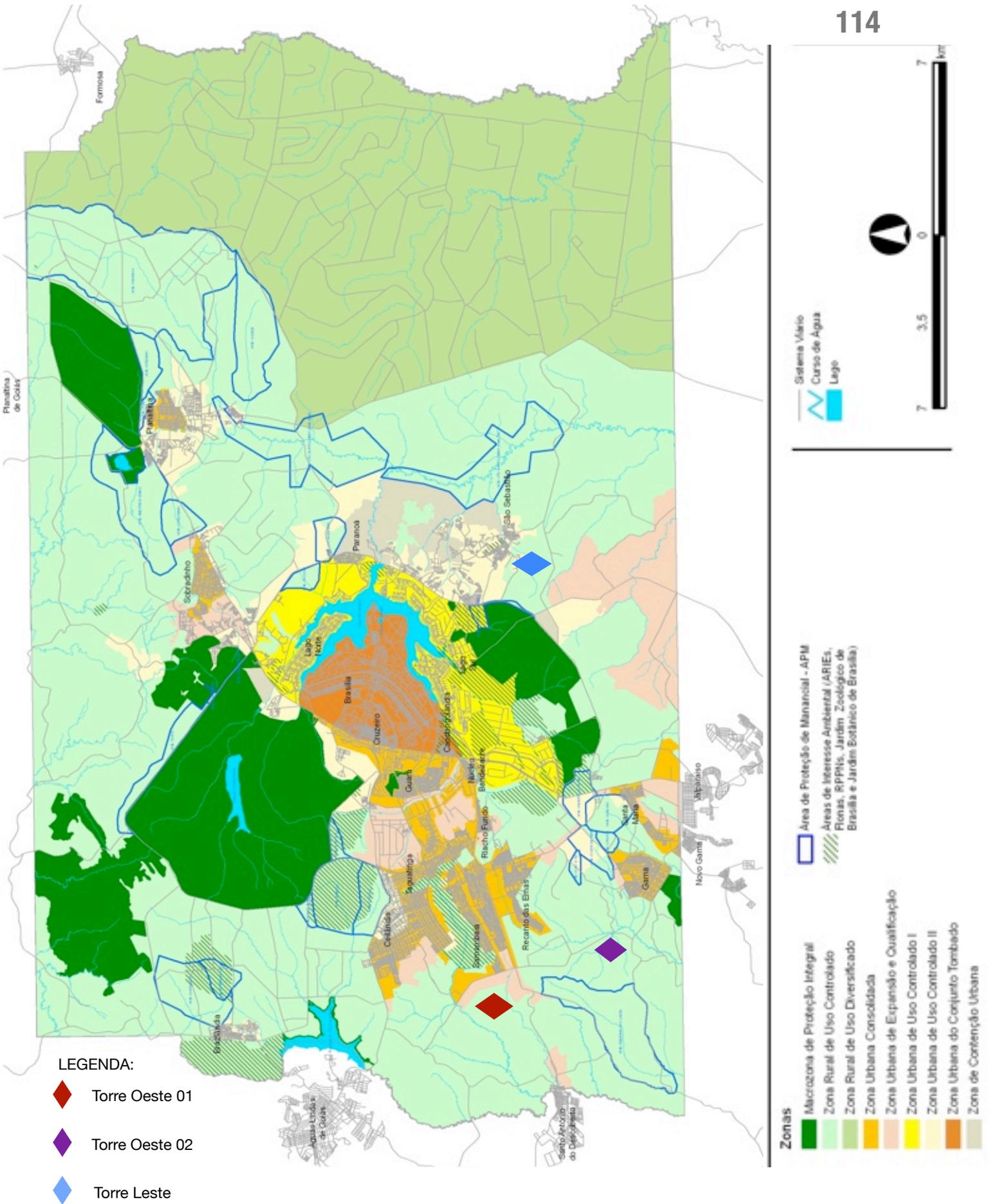


Figura 41. Zoneamento do uso do solo do Distrito Federal (adaptado de SEDHAB, 2012).

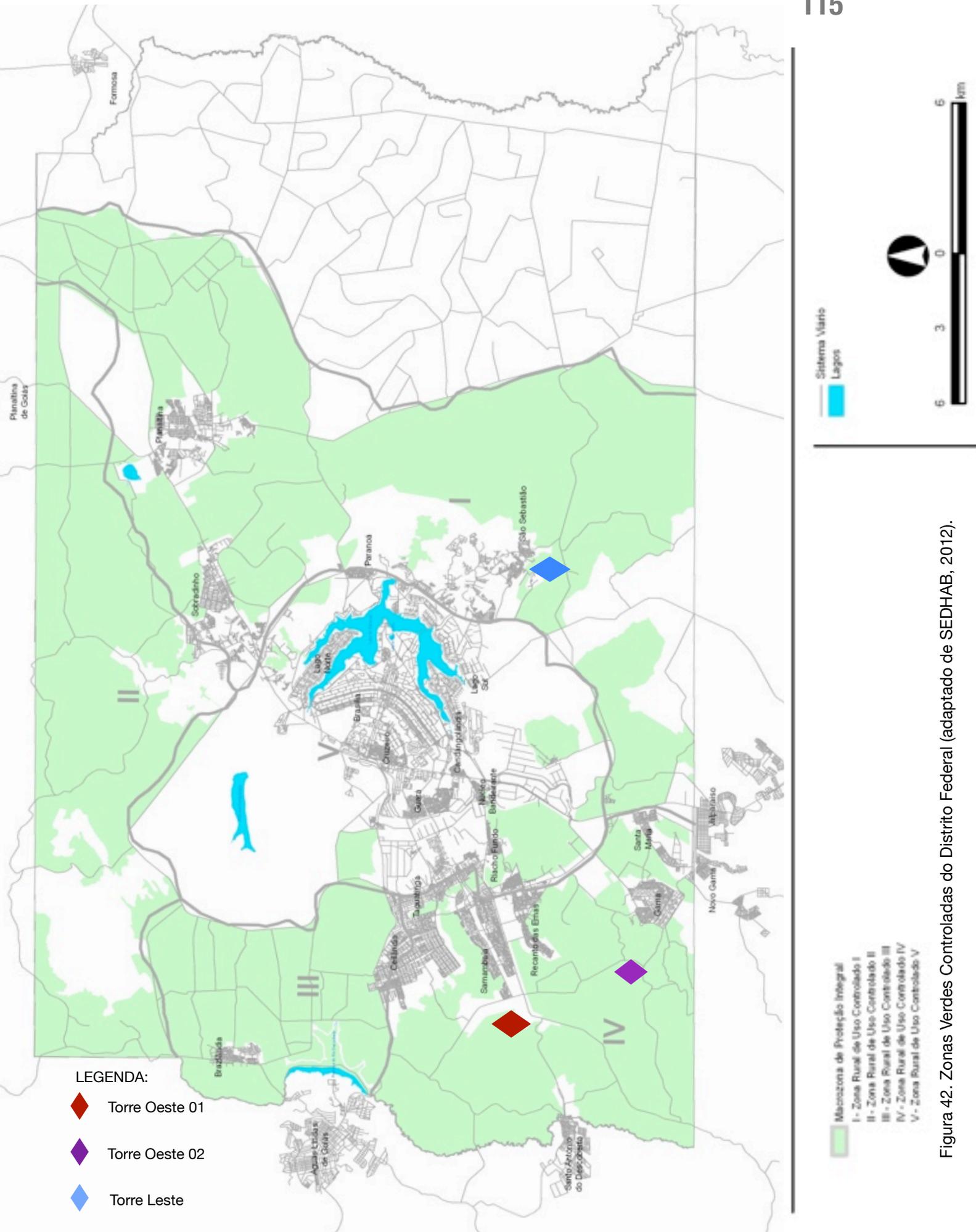


Figura 42. Zonas Verdes Controladas do Distrito Federal (adaptado de SEDHAB, 2012).

Foram considerados ainda na escolha dos locais a declividade do terreno (que deve ser mínima), o tipo de vegetação (que deve ser pouco densa), a quantidade de irradiação solar (que deve ser máxima), e a ocorrência de chuvas (que deve ser baixa) (**Figuras 43, 44, 45 e 46**).

Dessa forma, a **Figura 43** apresenta o mapa de declividade. Percebe-se que as Torres Oeste 01 e 02 se situam em áreas com declividade de 0 a 8% (áreas alaranjadas e amarelas), já a Torre Leste se situa em terreno mais acidentado com 8 a 30% de declividade (área verde). Nesse sentido, a localização desta última se torna menos propícia a implantação da tecnologia.

A **Figura 44** se trata do mapa de classes vegetais do DF. As Torres Oeste 01 e Leste se encontram em áreas de classe 02 (áreas verdes - campo, capoeira e reflorestamento), a Torre oeste 02 se situa na classe 06 (área de agropecuária - terra arada, plantios e pastos), logo, todas são ideais para a implantação da Chaminé Solar.

Na **Figura 45** há a indicação da temperatura de superfície da capital federal. Buscou-se inserir as três Chaminés Solares em áreas de maior intensidade, logo se situam em 22°C, em áreas alaranjadas mais escuras.

Finalmente, o último critério analisado na **Figura 46** foi o índice de pluviosidade, ou seja, a ocorrência de chuvas. As Torres Oeste 01 e Leste se situam em baixa pluviosidade média de 1,35 a 1,45 mm ao ano. Já para a Torre Oeste 02, o valor varia de 1,45 a 1,65 mm ao ano.

Nesse sentido, a Torre Oeste 01 é a que atende a mais fatores de implantação da Chaminé Solar. Logo, de acordo com os mapas apresentados, representa o local proposto que possui mais vantagens para o melhor funcionamento da tecnologia no território e clima do Distrito Federal.

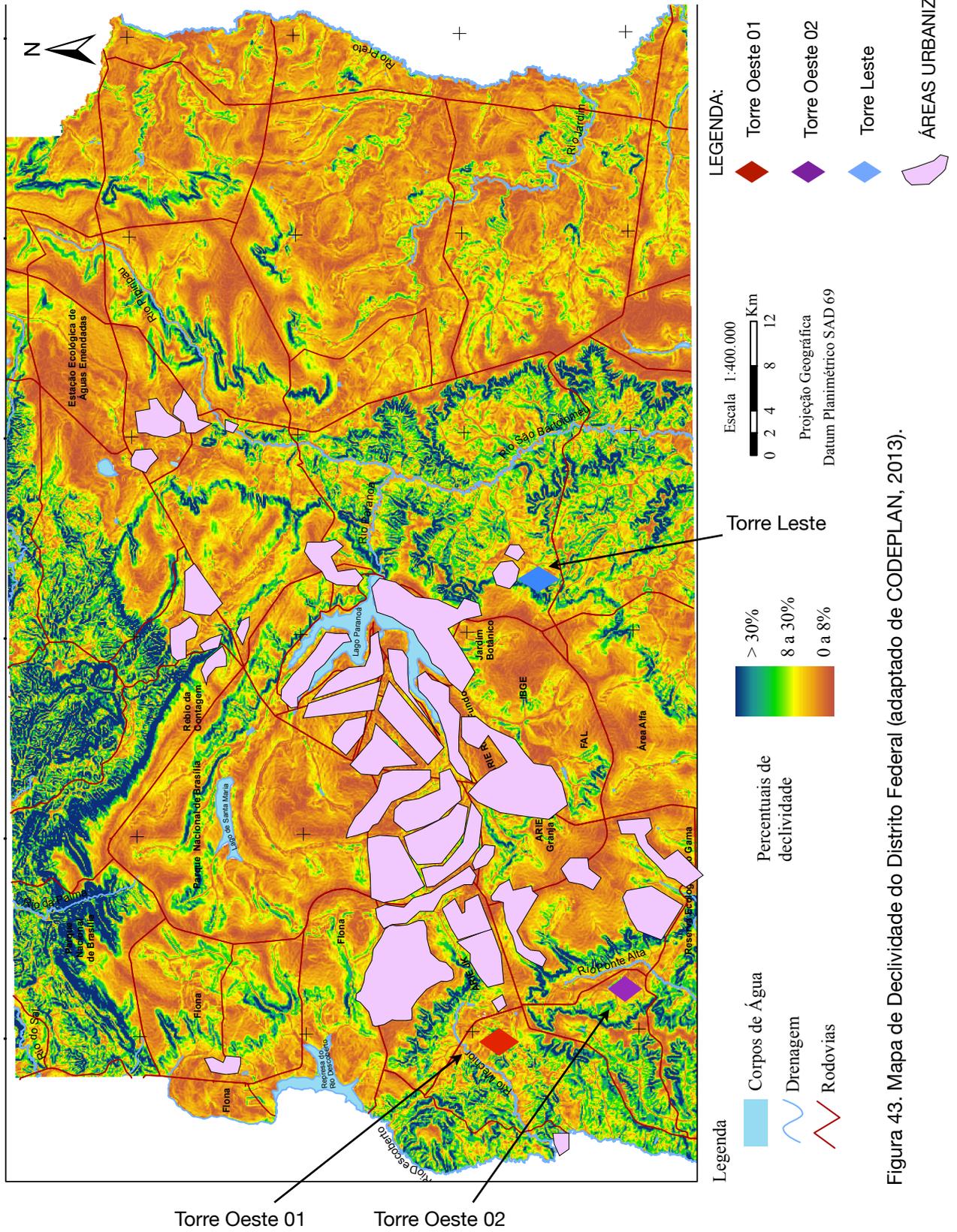


Figura 43. Mapa de Declividade do Distrito Federal (adaptado de CODEPLAN, 2013).

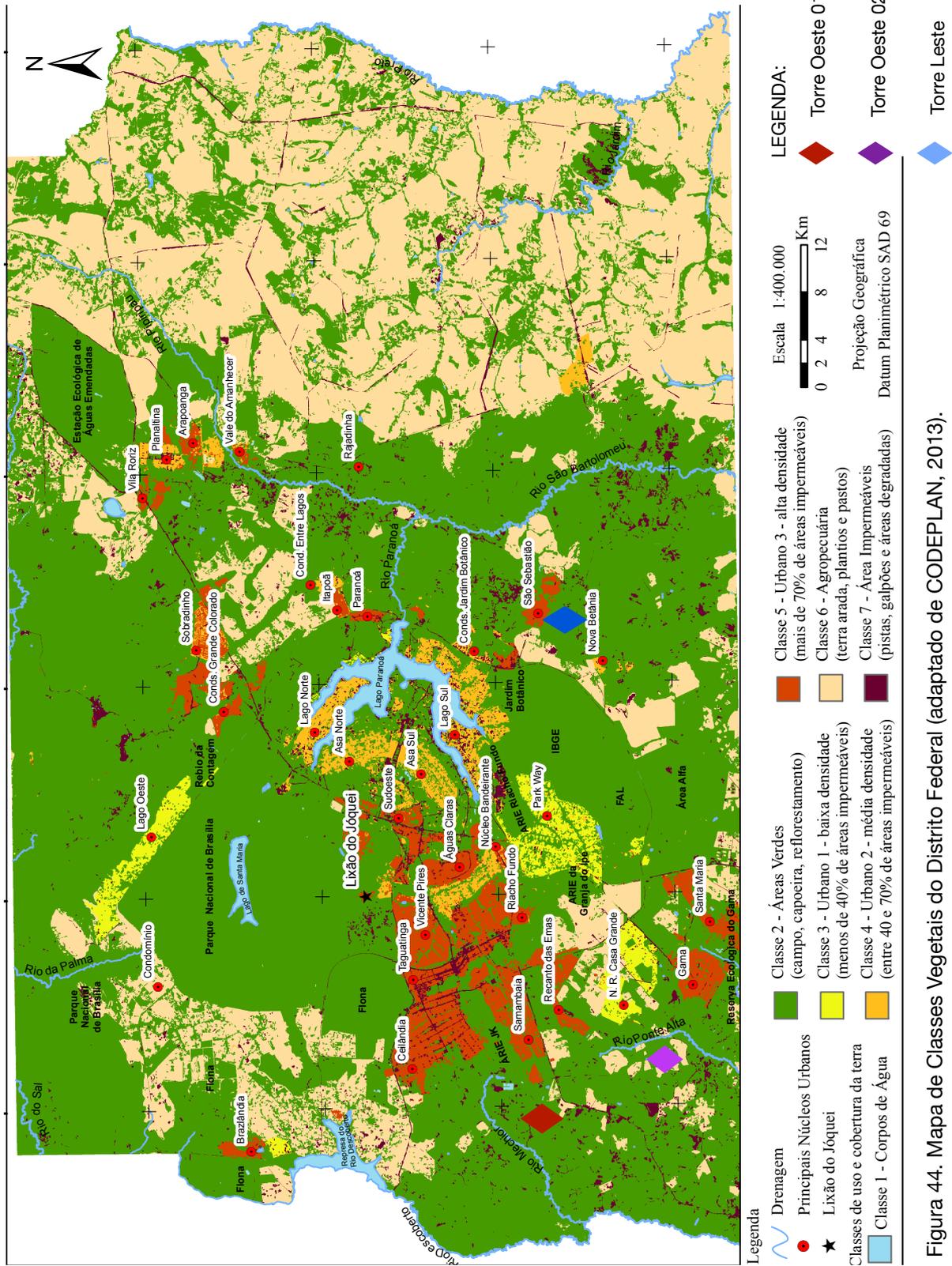


Figura 44. Mapa de Classes Vegetais do Distrito Federal (adaptado de CODEPLAN, 2013).

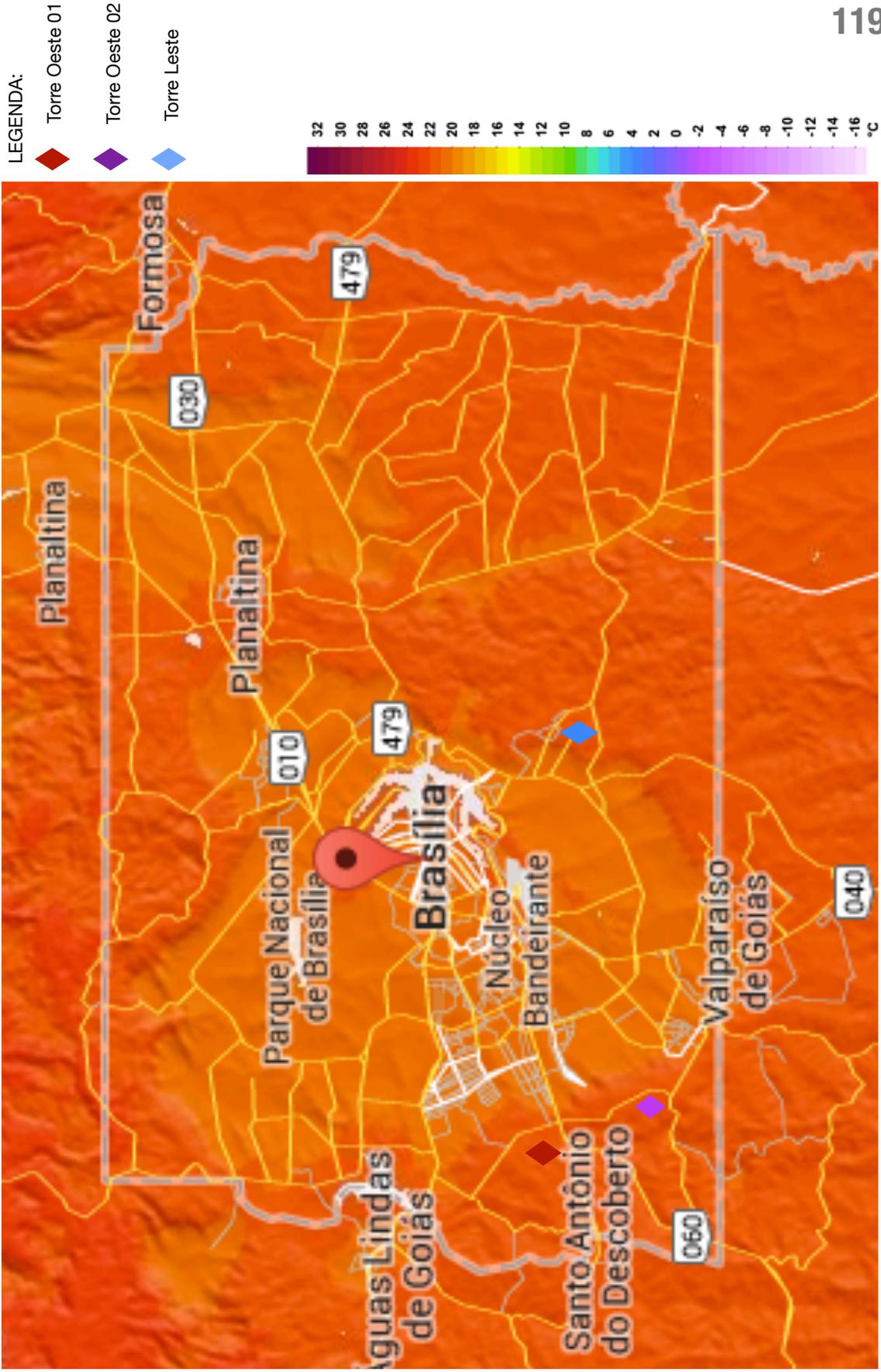


Figura 45. Mapa de Temperatura do Solo do Distrito Federal (adaptado de SOLARGIS, 2013).

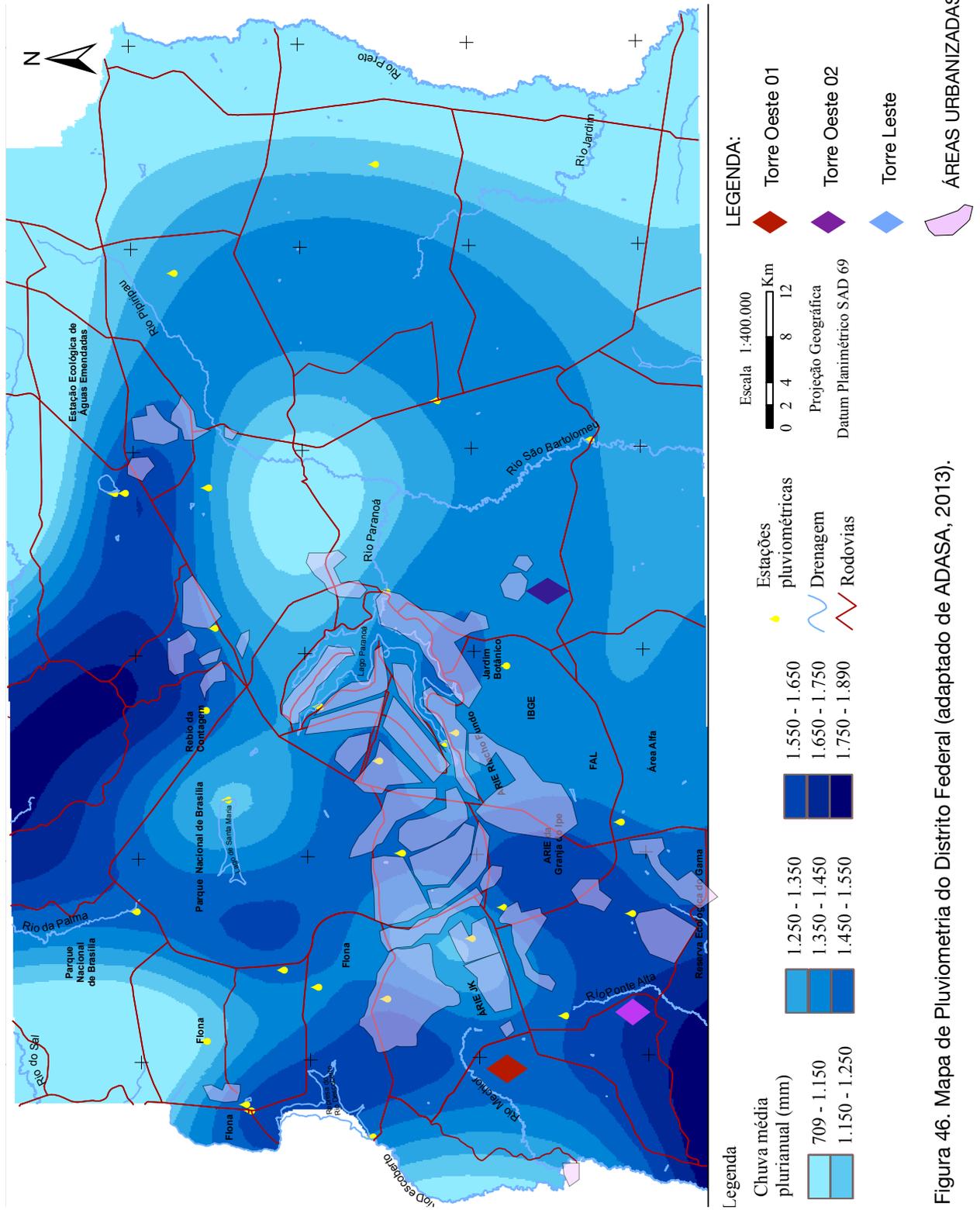


Figura 46. Mapa de Pluviometria do Distrito Federal (adaptado de ADASA, 2013).

Assim, a **Figura 47** representa espacialmente a localização da Torre Oeste 01 proposta. Nesse sentido se situa ao lado de Samambaia, cidade com subestação de energia elétrica Monjolo, que liga Recanto das Emas e Samambaia. Esta possui 13,8 KW de potência. Com o advento da Chaminé Solar, 5.400 KW seriam adicionados a rede local, podendo assim, atender a um número maior de consumidores.

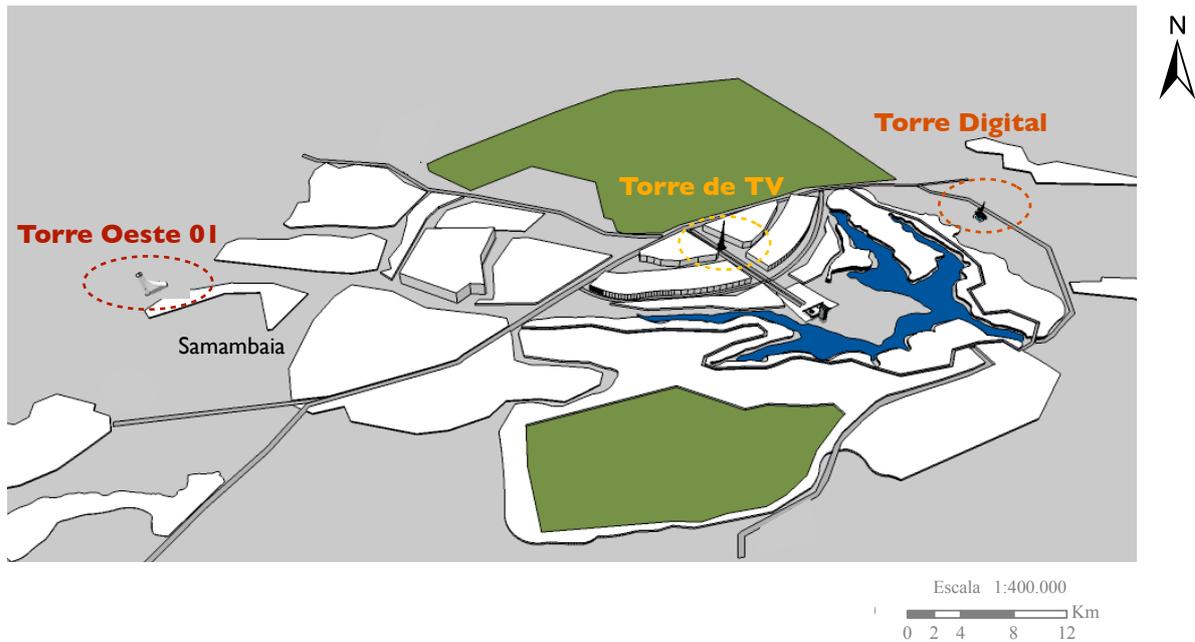


Figura 47. Representação espacial das massas urbanas do DF e seus marcos verticais.

A Usina Chaminé Solar é uma tecnologia de geração de energia limpa pois converte energia solar térmica em energia elétrica. Sua utilização proporciona benefícios para o meio ambiente como a economia de combustível fóssil e a redução de emissão de gases do efeito estufa. Dessa forma, sua principal diretriz de implantação é a grande incidência de radiação solar na região.

O Brasil é um país que se beneficia de forte radiação solar global, devido a sua localização perto do trópico. Assim, o fato de a Chaminé Solar utilizar a energia solar como fator primordial para seu funcionamento, permite que se escolha entre vários locais para a sua construção. Locais que, em alguns casos, poderão ser mais vantajosos do que outros devido aos fatores específicos de implantação da tecnologia.

Após a análise da matriz energética brasileira, percebe-se que há a preocupação com a complementação do setor de hidrelétricas no Brasil. A matriz energética é um conjunto de balanços energéticos periódicos, construída para período de tempo futuro. Se devidamente construída, é instrumento para o estabelecimento de políticas públicas.

No Brasil, sua análise demonstra que o uso de fontes alternativas ocorre essencialmente através da biomassa e da energia eólica. Percebe-se que ainda é incipiente no país o incentivo ao estudo e implantação de fontes solares de produção de energia modernas e limpas.

No Distrito Federal o crescimento desordenado da cidade ocasiona demanda maior de energia em centros urbanos em desenvolvimento. Nesse sentido, a preocupação com o desenvolvimento urbano sustentável possui relação direta com a paisagem do ambiente construído.

Percebe-se hoje nas mídias atuais a preocupação com o baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas que abastecem a maior parte do país. Nesse contexto, em 2001, o DF foi uma das regiões que sofreu com o racionamento de energia elétrica.

Dessa forma, embora a CEB abasteça o DF com 31 subestações espalhadas pelas regiões administrativas, o consumo cada vez maior, e a crescente demanda de energia da região suscitam o desenvolvimento de alternativas viáveis para o problema do setor elétrico.

A capital federal é pólo atrativo de crescimento e novos investimentos. Nesse sentido, agir de forma planejada sobre o espaço urbano implica conhecimento sobre o ambiente e a paisagem.

Logo, é essencial o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias, que possam complementar cada vez mais a distribuição local, e a longo prazo, eliminar a dependência das grandes usinas hidrelétricas como Furnas e Itaipu e atender a crescente demanda de energia da Capital Federal.

Nesse contexto, a Chaminé Solar pode ser uma das alternativas para a substituição de fontes fósseis de geração de energia no país. Por isso, é importante a comparação com outros tipos de fontes de energia limpa, de maneira a se entender suas características, além de suas vantagens e desvantagens em relação a cada contexto local.

O output elétrico de uma chaminé solar é proporcional às dimensões da sua estrutura. Dessa forma, variando o volume que existe entre a altura da chaminé e a área do coletor, pode-se chegar a diferentes combinações de altura e área, com o mesmo valor de output elétrico final. Dessa forma, não existe uma dimensão ótima para cada componente, e sim um conjunto a ser considerado para cada projeto e seus objetivos específicos.

Nesse sentido, percebe-se que é possível prever um output elétrico de uma Chaminé Solar para a região do Distrito Federal, desde que se proponha dimensões (altura da chaminé e área do coletor) fixas, que seja compatível com nossa escala urbana.

Além disso, a Chaminé Solar possui algumas vantagens e especificidades com relação aos outros tipos de Usinas. Primeiro, não necessita de água em seu funcionamento, o que permite a sua aplicação em regiões desérticas, com alta incidência de radiação solar.

Para implantação da Chaminé Solar não há a necessidade de uso de tecnologia avançada, bem como de mão de obra especializada. Embora o coletor ocupe grande área em relação à potência final, há a possibilidade de uso dessa área logo abaixo do coletor, visto que o solo se torna fértil e o calor permanece suportável.

Nesse sentido, um fator fundamental de seu funcionamento é a possibilidade de uso do solo logo abaixo do coletor. Assim há a possibilidade de ajudar a fixar as populações nas regiões rurais, fornecendo-lhes não só energia, como emprego, especialmente na agricultura ou em atividades a ela relacionadas.

Outro fator é a sua relativa estabilidade de funcionamento, que poderá ser explorada de forma a operar como uma central autônoma. Isso permite a construção de centrais em vários pontos do DF, poupando muitos quilômetros de rede de transporte.

Além disso, se funcionar concomitantemente com a fonte principal (hidrelétrica), pode reduzir o tempo de chegada da rede elétrica a locais estratégicos do entorno do Plano Piloto, bem como aliviar a demanda em tempos de escassez de chuvas nas barragens.

Nesse contexto, uma das principais causas de apagões no país ainda é o baixo nível do reservatório em alguns períodos de seca. Embora a Chaminé Solar não tenha uma disponibilidade de serviço total, poderá fornecer parte importante da energia, a longo prazo, com uma rede interligada. Principalmente durante o período diurno, o que permite maior armazenamento da água das barragens para o verão ou períodos de maior consumo.

A implantação de fontes alternativas como a Chaminé Solar no DF também possibilita, a longo prazo, menor dependência das usinas de Furnas e Itaipu.

No entanto, existem fatores necessários para seu funcionamento e implantação que podem diminuir sua eficiência a curto prazo, visto que o desenvolvimento de novas tecnologias e métodos devem ser viáveis de acordo com a realidade e o grau de desenvolvimento de cada região.

O primeiro fator se refere ao custo. Logo, primeiro devem ser estabelecidas estratégias e políticas energéticas para o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis no país, a fim de haver a regulação da fonte antes de sua aplicação. Nesse contexto, a distribuição da energia de uma Chaminé Solar deve apresentar preços competitivos para ser aceita como alternativa viável.

Outro fator relevante é a condição climática. Verificou-se que boa parte do território brasileiro recebe maior radiação solar do que muitos dos países europeus, onde grande número de projetos de energia solar estão sendo implementados, principalmente como resultado da boa regulação de energia voltada às fontes renováveis.

Assim, fatores que influenciam a implantação da Chaminé Solar foram analisados mais a fundo a partir de dados e mapas do Distrito Federal e suas Regiões Administrativas. Logo, foram propostas três áreas para receber a tecnologia de

acordo com a expansão urbana da cidade com a indicação das Torres Oeste 01, Oeste 02 e Leste.

Dentre as possibilidades analisadas apresenta-se mais vantajosa a Torre Oeste 01, situada ao lado da região administrativa de Samambaia, pois sua localização possui a menor declividade, a maior temperatura de superfície, além de se encontrar em área verde sem ocupação antrópica.

Em conclusão, pode-se afirmar que, embora nossa matriz seja mais limpa, os projetos de governo ainda se encontram atrasados. O Brasil já poderia ter implementado a virada energética, em que 100% da sua matriz energética seria advinda de fontes renováveis. A Chaminé Solar seria somente uma das alternativas, mas seria útil e relevante. Por isto, neste trabalho apresenta-se proposta da aplicação para o Distrito Federal, capital do país e centro político capaz de viabilizar projetos inovadores.

Dessa forma, a implantação de uma Chaminé Solar no Distrito Federal é sim possível, basta aliarmos planejamento urbano e energético responsável e de longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA. Disponível em: http://www.adasa.df.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=384%3Asistema-de-recursos-hidricos-do-df-mapa-isoietas&catid=79&Itemid=303. Acesso em 2013-12-01.

ADMINISTRAÇÃO DE BRASÍLIA. Disponível em: http://www.portalbrasil.net/brasil_cidades_brasilia_ras.htm. Acesso em 2013-12-01.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2012: ano base 2011. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas Energia, Rio de Janeiro, 2012.

BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica. 2004. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BERNARDES, Marco Aurélio dos Santos. Solar Chimney Power Plants - Developments and Advancements. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2003

BERNARDES, Marco Aurélio dos Santos, VOß, A. e WEINREBE, G. Thermal and technical analyses of solar chimneys. *Solar Energy*, 75, 511-524, Stuttgart, Alemanha, 2003.

BOBEK, A. Estudo tecno-econômico para a implantação de uma chaminé solar no norte do Brasil. Monografia. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2010.

BONNELLE, Denis. An Economicaly Realistic growth Path towards Kilometric Chimneys. 2012.

BONNELLE, Denis, SIROS, Frederic e PHILIBERT, Cedric. Concentrating Solar Parks with Tall Chimneys Dry Cooling. Apresentação no Congresso Solar Paces 2010, 21-24 Perpignan, França, 2010.

BONNELLE, Denis. Solar Chimneys, Energy Towers, etc. Doutorado, Universidade de Lyon, França, jan 2005.

CEB, História da Energia no DF, 2013. Disponível em: http://www.ceb.com.br/Ceb/Ceb/visualizar_texto.cfm?idtxt=306. Acesso em 2013-05-10.

CORREIA, Salatiel Pedrosa Soares. Setor elétrico brasileiro: uma falência mais do que anunciada: o caso CELG e outros escritos. Rio de Janeiro : Synergia , 2010.

CNI. Confederação Nacional da indústria. instituto brasileiro de Petróleo, Gás e biocombustíveis. A contribuição do setor brasileiro de petróleo, gás e biocombustíveis para o desenvolvimento sustentável no país / Confederação Nacional da indústria. instituto brasileiro de Petróleo, Gás e biocombustíveis. – Brasília : CNI, 2012.

Decreto nº 11921. Disponível em: http://www.sedhab.df.gov.br/images/estudos_territorios/dossie_ras/paranoa/decreto_11921_25101989.pdf. Acesso em 2013-12-01.

DUFOUR, Javier. Las Torres Solares: una tecnología de producción de electricidad limpia y de altura. Energía e Sostenibilidad, 2008. Disponível em: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2008/05/16/91984>. Acesso em 2011-07-10.

EMBAIXADA VERDE. Disponível em: <http://www.embaixadaverde.com/>. Acesso em 2013-12-01.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012). Disponível em: www.epe.gov.br/. Acesso em 2013-02-26.

EnviroMission, 2013. Disponível em: <http://www.enviromission.com.au/EVM/content/home.html>. Acesso em 2012-01-13.

Except, Creating the Foundation for a Sustainable Future. Solar Updraft Tower Variations and Research, 2008. Disponível em: http://www.except.nl/consult/SolarUpdraftTower/solar_updraft_research.html. Acesso em 2011-07-25.

FLURI, T. P.; PRETORIUS, J. P.; VAN DYK, C.; VON BACKSTRÖM, T. W.; KRÖGER, D. G.; VAN ZIJL, G. P. A. G. Cost analysis of solar chimney power plants. Solar Energy, Volume 83, 246-256, 2009.

GANNON, A.J. e VON BACKSTRÖM, T.W. The solar chimney air standard thermodynamic cycle, SAIMEchE R&D Journal, 2000.

GELLER, Howard S. Revolução energética: políticas para um futuro sustentável; tradução Maria Vidal Barbosa, Rio de Janeiro, editora Relume Dumará, 2003.

GOLDEMBERG, José. Energia e Desenvolvimento sustentável. / Série sustentabilidade, v. 4. São Paulo: Blucher, 2010.

GOLDEMBERG, José e CHU, Steven. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho / Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo ; tradução, Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. – [São Paulo] : FAPESP ; [Amsterdam] : InterAcademy Council; [Rio de Janeiro] : Academia Brasileira de Ciências, 2010.

GOLDEMBERG, José e LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. Revista Estudos Avançados 59 - Dossiê Energia, São Paulo, nov 2006.

IBGE, 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em 2013-07-23.

INMET, 2011. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em 2011-12-11.

JATOBÁ, Sérgio. Seminário Regional: Estratégias de desenvolvimento para a região geoeconômica de Brasília. Influência urbana e econômica de Brasília, Brasília, 2011.

KETLOGETSWE, C.; FISZDON, J. K.; SEABE, O. O. Solar chimney power generation Project – the case for Botswana. Renewable & Sustainable Energy Reviews, Volume 12, 2005-2012, 2008.

LEFF, Enrique. Saber Ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder. Tradução Lúcia Orth, 6a edição, ed. Vozes, Rio de Janeiro, 2008.

Lei nº 49/25101. Disponível em: http://www.sedhab.df.gov.br/images/estudos_territorios/dossie_ras/legislacao_distrital/lei_49_25101989.pdf. Acesso em 2013-12-01.

Jornal Brasil 247. Disponível em: <http://www.brasil247.com/pt/247/economia/89915/>. Acesso em 2013-02-15.

MARTINS, Fernando R., Pereira E.B., Silva S.A.B., Abreu S.L., Colle S. .Energy Policy, Solar energy scenarios in Brazil. Elsevier Ltda, 2008.

MENDES, Jefferson Marcel Gross. Dimensões da Sustentabilidade. Revista das Faculdades Santa Cruz, v. 7, nº 2, jul/dez 2009.

Ministério Chinês, 2010. China Energy Sector, disponível em:<http://chinaenergysector.com/2010/12/20/>. Acesso em 2011-10-23.

MME. Usina Hidrelétrica de Belo Monte. Disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/menu/belo_monte.html. Acesso em 2013-05-22.

NASA, Climate and Earth's Energy Budget, Rebecca Lindsey, 2009. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page3.php>. Acesso em 2013-05-08.

NEVES, Ludiekueno dos Santos. Chaminé Solar, uma alternativa para Angola? Dissertação, Gestão de Sistemas Ambientais, Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, Lisboa, ago 2005.

PALETTA, Francisco C., GOLDEMBERG J. et al. Energias Renováveis, São Paulo: Blucher, 2012.

PEREIRA E.; Martins, F.; Abreu S., Ruther R. Atlas brasileiro de energia solar, INPE, São José dos Campos, 2006.

Petrobrás, 2013. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/energia%2De%2Dtecnologia/fontes%2Dde%2Denergia/petroleo/presal/>. Acesso em 2013-12-21.

Plano Nacional de Energia 2030 (PNE, 2007). Ministério de Minas e Energia, colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, MME.

Portal Brasil, 2010. A Matriz Energética Brasileira. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/cop/panorama/o-que-o-brasil-esta-fazendo/matriz-energetica>. Acesso em 2013-02-21.

REIS, Lineu Belico dos, E. Fadigas, C. Carvalho. Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável. Braueri, São Paulo, ed. Manoele Ltda, 2005.

RIBEIRO, Rômulo J. C. Índice Composto de Qualidade de Vida Urbana - Aspectos de Configuração Espacial, Socioeconômicos e Ambientais Urbanos. Tese doutorado, UnB, Brasília, agosto 2008.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. Princípios bioclimáticos para o desenho urbano. ProEditores, 2ª edição. São Paulo, 2000.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. Arquitetura Bioclimática do Espaço Público. Brasília. Editora da UnB, 2001.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. O desafio da construção de cidades. Revista AU, ed. PINI , ano 21, nº 142, São Paulo, jan 2006. Disponível em: <http://www.revistaau.com.br/arquitetura-urbanismo/142/artigo21835-1.asp>, acessado em 29/09/2011.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. Arquitetura do lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília, Nova Técnica Editorial, 1ª edição. São Paulo, 2011.

SEDHAB. Disponível em: <http://www.sedhab.df.gov.br/dossie-regioes-administrativas.html>. Acesso em 2013-12-01.

SHASHA, Deng. China's first solar chimney plant starts operating in desert. Chinese Government's Official Web Portal, dez de 2010.

SCHLAICH, Jörg, BERGERMANN, Rudolf, SCHIEL, Wolfgang e WEINREBE, Gerhard. Design of Commercial Solar Tower Systems - Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power. In. Proceedings of the international Solar Energy Conference, Kohala Coast, Estados Unidos, 2003.

SCHLAICH, Jörg e SCHIEL Wolfgang. Solar Chimneys, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd edição, Ed. Academic Press, Londres, 2002.

SCHLAICH, Jörg. The Solar Chimney: Electricity from the Sun. Ed. Axel Menges, Stuttgart, set 1995.

SCHLAICH, Jörg, Schiel, W., Friedrich, K., Schwarz, G., Wehowsky, P., Meinecke, W., and Kiera, M. ““Abschlußbericht Aufwindkraftwerk, Übertragbarkeit der Ergebnisse von Manzanares auf größere Anlagen.““ BMFT- Förderkennzeichen 0324249D, Stuttgart, Alemanha, 1990.

STROBEL, Christian Scapulatempo; MOURA, Luís Mauro; MARIANI, Viviana Cocco. Análise do potencial energético do uso de chaminés solares no Brasil. 2012. 184 f. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2012.

SWERA. Disponível em: <http://swera.unep.net/>. Acesso em 2013-12-02.

TERRACAP. Disponível em: <http://www.terracap.df.gov.br/portal/>. Acesso em 2013-12-01.

VOGT, Carlos. O petróleo e a agressão ao meio ambiente. SBPC/Labjor Brasil, 2002. Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/petroleo/pet09.shtml>, Acesso em 2013-12-01.

VON BACKSTRÖM, T. W.; GANNON, A.J. Solar chimney turbine characteristics. Solar Energy, Volume 76, 235-241, 2004.

Anexo 01 - Subestações de energia do DF

A CEB conta com 30 subestações (SEs) de subtransmissão espalhadas por todo DF.
Segue abaixo a relação de cada uma delas:

Subestação 01

34,5 / 13,8 kV - W/5 Sul - Entrequadras 910/911 (em frente ao hospital Naval)

Subestação 02

34,5 / 13,8 kV - W/5 Sul - Entrequadras 704/904 - Área Especial (próximo a AEUDF)

Subestação 03

34,5 / 13,8 kV - GIANFRANCO CACNI - SGAN - Qd. 902 - W/5 Norte (ao lado do Colégio Militar)

Subestação 04

34,5 / 13,8 kV - SGAN - Qd. 911 - W/5 Norte (ao lado da Casa do Ceará e do Colégio Santa Dorotéia)

Subestação 05

34,5 / 13,8 kV - Setor de Embaixadas Sul - Qd. 806 (em frente à Embaixada da Suécia)

Subestação 06

34,5 / 13,8 kV - Esplanada dos Ministérios - Via N2 - subsolo do Ministério da Educação MEC

Subestação 07

34,5 / 13,8 kV - SHIN - Península Norte, QL 05 - Conj. 07 - às margens do Lago Paranoá

Subestação 08

34,5 / 13,8 kV e USINA TÉRMICA - SIA - Área de Serviços Públicos - Tr. 4 - Lt. A (perto do Moinho de Trigo Jauense)

Subestação 09

34,5 / 13,8 kV - Quadra 07 - Conjunto "J" - Lote 01, Paranoá - DF

Subestação 10

34,5 / 13,8 kV - SHIS Estrada Parque Dom Bosco, entre Quadras QI 21/23 - Área Especial F (ao lado do Posto de Saúde nº 5)

Subestação ÁGUAS CLARAS

138 / 13,8 kV - Avenida Sibipiruna nº 23, Águas Claras - Taguatinga - DF

Subestação BRASÍLIA CENTRO

138 / 34,5 / 13,8 kV - SAIN - Lt. A - Área Especial Lago Sul - entre a garagem do Congresso e a garagem do Palácio do Planalto (atrás da gráfica do Senado)

Subestação BRASÍLIA NORTE

138 / 34,5 / 13,8 kV - SAIN - Est. Abastecimento - Área A Via par RCG (Regimento de Cavalaria e Guarda), ao lado dos Transmissores da rádio Educadora do Ministério da Educação

Subestação BRAZLÂNDIA

34,5 / 13,8 kV - Via LW-1 - Área Especial 2 - Margem da rodovia BSB X Pe. Bernardo, próximo ao cemitério velho e em frente ao Posto de Gasolina (entrada da cidade de Brazlândia)

Subestação CEILÂNDIA NORTE

138 / 13,8 kV - DF 08 - Margens da BR-70 Via para Barragem do Descoberto, em frente a QNO 07/15 (antes do Condomínio Privê)

Subestação CEILÂNDIA SUL

138 / 69 / 13,8 kV - CAC - Centro Administrativo e Cultural Ceilândia - AE 1 ao lado da academia de Polícia (Final da Ceilândia Sul)

Subestação CONTAGEM

138 kV / 13,8 kV - Via DF 150 - Próximo à entrada para Sobradinho II

Subestação EUGÊNIO RAZZERO DE MORAES SARMENTO

64 / 13,8 kV - Setor de Embaixadas Sul

Subestação GAMA

34,5 / 13,8 kV - Av. Contorno - AE 1 - Balão - Início da Av. Contorno, em frente ao Posto de Gasolina nº 02 e próximo ao SLU junto a entrada da cidade

Subestação GUARÁ

34,5 / 13,8 kV - QE 08 - Área Especial K - Guarά I (Margens da EPTG), próximo ao viaduto sobre a ferrovia

Subestação MONJOLO

138 / 13,8 kV - QN 16, Conjunto 2, Lote 02 - Riacho Fundo II - margens da pista que liga Samambaia ao Gama e Recanto das Emas

Subestação NÚCLEO BANDEIRANTE

69 / 13,8 kV - Via DF-075 - Lt. A - Núcleo Bandeirante (Fundos HJKO - IAPI), acesso no início da Estrada Parque

Subestação PADF

69 / 13,8kV - NR PAD/DF - Mód. E-6 - Fazenda Santo Antônio - (margem da rodovia DF-270-Km 07), Núcleo Rural PAD-DF RA nº III

Subestação PLANALTINA

69 / 13,8 kV - SHD - Av. Independência - Área Especial - Setor Administrativo, em frente ao Desafio Jovem

Subestação SANTA MARIA

138 / 13,8 kV - ÁC 105 Conj. "F" - Lote 1 - Santa Maria

Subestação SÃO SEBASTIÃO

34,5 / 13,8 kV - Rodovia DF 135 - Lote CEB. Em frente ao Morro Azul - São Sebastião

Subestação SOBRADINHO

34,5 / 13,8kV - Área Especial - Qd. 1 - Sobradinho (em frente ao conjunto Residencial E-1)

Subestação SOBRADINHO TRANSMISSÃO

138 / 69 kV - Margens da BR-020 - Km 11 saída de Sobradinho, sentido Planaltina (em frente ao Reservatório da CAESB)

Subestação SUDOESTE

138 / 13,8 kV - CLSW 300 - Próximo ao Memorial JK

Subestação TAGUATINGA

138 / 34,5 / 13,8 kV - EPTG - Setor Norte (em frente QNA 13/14 - próximo ao viaduto de acesso a Taguatinga Centro)

Subestação USINA DO PARANOÁ

34,5 / 13,8 kV - Acesso pelo Lago Sul - Estrada Parque Dom Bosco ou acesso pelo Lago Norte - Estrada Parque Paranoá

Anexo 02 - Lista das Regiões Administrativas do Distrito Federal (SEDHAB, 2013)

1. RA I Brasília
2. RA II Gama
3. RA III Taguatinga
4. RA IV Brazlândia
5. RA V Sobradinho
6. RA VI Planaltina
7. RA VII Paranoá
8. RA VIII Núcleo Bandeirante
9. RA IX Ceilândia
10. RA X Guará
11. RA XI Cruzeiro
12. RA XII Samambaia
13. RA XIII Santa Maria
14. RA XIV São Sebastião
15. RA XV Recanto das Emas
16. RA XVI Lago Sul
17. RA XVII Riacho Fundo
18. RA XVIII Lago Norte
19. RA XIX Candangolândia
20. RA XX Águas Claras
21. RA XXI Riacho Fundo II
22. RA XXII Sudoeste/Octogonal
23. RA XXIII Varjão
24. RA XXIV Park Way
25. RA XXV SCIA - Setor Complementar de Indústria e Abastecimento (Cidade Estrutural e Cidade do Automóvel)
26. RA XXVI Sobradinho II
27. RA XXVII Jardim Botânico
28. RA XXVIII Itapoã
29. RA XXIX SIA - Setor de Indústria e Abastecimento
30. RA XXX Vicente Pires
31. RA XXXI Fercal